



SKRIPSI – TK141581

**PENGARUH EKSTERNAL RESISTANSI DAN
PENAMBAHAN *MOLASSES* PADA LUMPUR
LAPINDO UNTUK MENGHASILKAN BIOLISTRIK
DENGAN MENGGUNAKAN *MICROBIAL FUEL
CELLS***

Oleh:

VEBY SARAGIH

NRP. 02211340000093

KELITA MEA MELACA

NRP. 02211545000022

Dosen Pembimbing :

Dr. Eng. R. Darmawan, S.T., M.T.

NIP. 19780506 200912 1 001

Ir. Nuniek Hendrianie, M.T.

NIP. 19571111 198601 2 001

DEPARTEMEN TEKNIK KIMIA

FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI

INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER

SURABAYA 2018



FINAL PROJECT – TK141581

**EFFECT OF EXTERNAL RESISTANCE AND
ADDITION OF MOLASSES
TO LAPINDO MUD TO PRODUCE
BIOELECTRICITY
BY USING MICROBIAL FUEL CELLS**

By:

VEBY SARAGIH

NRP. 02211340000093

KELITA MEA MELACA

NRP. 02211545000022

Lecturer

Dr. Eng. R. Darmawan, S.T., M.T.

NIP. 19780506 200912 1 001

Ir. Nuniek Hendrianie, M.T.

NIP. 19571111 198601 2 001

**DEPARTMENT OF CHEMICAL ENGINEERING
FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY
SEPULUH NOPEMBER INSTITUTE OF
TECHNOLOGY
SURABAYA 2018**

LEMBAR PENGESAHAN

PENGARUH EKSTERNAL RESISTANSI DAN PENAMBAHAN *MOLASSES* PADA LUMPUR LAPINDO UNTUK MENGHASILKAN BIOLISTRIK DENGAN MENGUNAKAN *MICROBIAL FUEL CELLS* (MFCs)

Diajukan untuk Memenuhi Salah Satu Syarat Memperoleh
Gelar Sarjana Teknik pada
Program Studi S-1 Departemen Teknik Kimia,
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya

Oleh:

Veby Debora Saragih

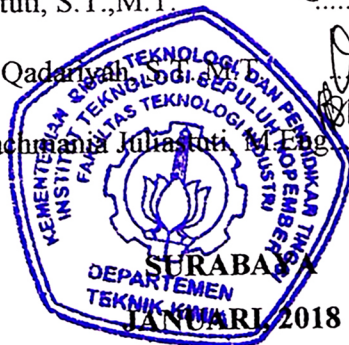
(02211340000093)

Kelita Mea Melaca

(02211545000022)

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Dr. Eng. R. Darmawan, S.T., M.T. (Pembimbing I)
2. Ir. Nuniek Hendrianie, M.T. (Pembimbing II)
3. Dr. Widiyastuti, S.T., M.T. (Penguji I)
4. Dr. Lailatul Qadariah, S.T., M.T. (Penguji II)
5. Dr. Ir. Sri Rachmanita Juliajuti, M.Eng. (Penguji III)



**PENGARUH EKSTERNAL RESISTANSI DAN
PENAMBAHAN *MOLASSES* PADA LUMPUR LAPINDO
UNTUK MENGHASILKAN BIOLISTRIK DENGAN
MENGUNAKAN *MICROBIAL FUEL CELLS***

Nama Mahasiswa :1. Veby Saragih (02211340000093)
2. Kelita Mea M. (02211545000022)
Dosen Pembimbing : Dr. Eng. R. Darmawan, S.T., M.T.
Ir. Nuniek Hendrianie, M.T.
Departemen : Teknik Kimia
Fakultas : Teknologi Industri

ABSTRAK

Saat ini kebutuhan energi dunia terutama listrik semakin meningkat. Hal ini terjadi akibat meningkatnya laju pertumbuhan penduduk serta pesatnya perkembangan sektor industri. Di sisi lain ketersediaan energi berbasis fosil untuk memenuhi kebutuhan energi listrik semakin menipis. Oleh karena itu dibutuhkan sumber energi alternatif yang dapat diperbaharui. Salah satu teknologi yang dikembangkan untuk menggantikan energi berbasis fosil adalah *Bio electrochemical systems* (BESs). Tipe BESs yang paling banyak digunakan adalah *microbial fuel cells* (MFCs). *Microbial fuel cells* (MFCs) merupakan perangkat yang menggunakan mikroorganisme aktif (bakteri) sebagai biokatalis untuk mengoksidasi kandungan organik dan anorganik dengan proses anaerobik untuk menghasilkan biolistrik. Pada perangkat MFCs dibutuhkan *exoelectrogens*, yaitu mikroorganisme yang memiliki kemampuan untuk menghasilkan biolistrik. Salah satu substrat yang dapat digunakan dalam sistem MFCs adalah lumpur. Lumpur Lapindo memungkinkan adanya bakteri *exoelectrogen* yang dibutuhkan MFCs tersedia pada lumpur itu sendiri membuat lumpur Lapindo sangat optimal untuk digunakan sebagai matriks MFCs. Selain itu, pemanfaatan Lumpur Lapindo juga lebih ekonomis, mengingat keberadaannya yang melimpah dan dianggap sebagai bencana. Kebutuhan sumber energi yang digunakan

untuk metabolisme bakteri akan disuplai dengan penambahan *molasses*. Selain itu, penggunaan eksternal resistansi yang bervariasi diaplikasikan guna mencari kondisi optimum pada *MFCs*. Dengan melihat potensi sebagai sumber alternatif listrik di masa depan, maka penambahan *molasses* pada Lumpur Lapindo dengan variasi eksternal resistansi dapat dipertimbangkan sebagai metode yang menjanjikan guna menghasilkan listrik (biolistrik) yang optimal. Dalam penelitian ini, pengaruh eksternal resistansi dan penambahan *molasses* pada *MFCs* dipelajari. Terdapat lima variabel eksternal resistansi yang diterapkan yakni 1 k Ω , 10 k Ω , 100 k Ω , 1000 k Ω , dan 5100 k Ω . Sedangkan konsentrasi *molasses* yang digunakan adalah 1,25%, 2,5%, 5%, 10% hingga 15% massa substrat. Pada penelitian ini digunakan elektroda *carbon cloth* dan kabel *Ti-wire*. Hasil optimum diperoleh pada 1 k Ω dengan tegangan listrik sebesar 210,25 volt/m² dan arus listrik sebesar 51,75 A/m² dan power density sebesar 38,91 watt/ m² pada variabel penambahan *molasses* 2,5% menggunakan *Ti-wire*. Hal ini menunjukkan bahwa dengan eksternal resistansi yang meningkat tidak membuat tegangan listrik semakin bertambah. Penambahan dominan bakteri *Shewanella oneidensis* MR-1 dan *Escherichia coli* sebagai *starter inoculum* tidak efektif dalam menghasilkan biolistrik.

Kata Kunci: biolistrik, eksternal resistansi, lumpur Lapindo, *MFCs*, *molases*

EFFECT OF EXTERNAL RESISTANCE AND ADDITION OF MOLASSES TO LAPINDO MUD TO PRODUCE BIOELECTRICITY BY USING MICROBIAL FUEL CELLS

Name :1.Veby Saragih (02211340000093)
2. Kelita Mea M. (02211545000022)
Advisors : Dr. Eng. R. Darmawan, S.T., M.T.
Ir. Nuniek Hendrianie, M.T.
Department : Chemical Engineering
Faculty : Industry Technology

ABSTRACT

Currently the world's energy demand, especially electricity increases rapidly. This is due to the increase of population growth rate and the rapid development of industrial sector. On the other hand the availability of fossil-based energy for electricity is running low. Therefore, the needs of renewable alternative energy sources is very important. One of the technologies developed to replace the fossil-based energy is Bio electrochemical systems (BESs). The most widely used type of BESs is the microbial fuel cells (*MFCs*). Microbial fuel cells (*MFCs*) are devices that use active microorganisms (bacteria) as biocatalyst to oxidize organic and inorganic compounds with anaerobic processes to produce bio-electricity. The *MFCs* require exoelectrogen, microorganism that has the ability to produce bio-electricity. The *MFCs* system also needs electrode and substrate. One of the substrates that can be used in *MFCs* systems is mud. With Lapindo mud possible availability of electrogens bacteria needed for *MFCs* available in the mud itself, made Lapindo mud excellent for *MFCs* matrices. In addition, the utilization of Lapindo mud is more economical, considering its abundant availability and its status as a disaster. The energy source required for bacterial metabolism is supplied by the addition of *molasses*. Varies external resistance is applied to find the optimum conditions for *MFCs*. Considering the potential as an alternative source of electricity in the future, the

addition of *molasses* to Lapindo mud with external resistance variations can be considered as a promising method for optimum bio-electricity generation. In this study, the effect the addition of *molasses* and external resistance on *MFCs* systems were observed. There are five external variables of applied resistance that is 1 k Ω , 10 k Ω , 100 k Ω , 1000 k Ω , and 5100 k Ω . Whereas the *molasses* concentration used are 1.25%, 2.5%, 5%, 10% to 15% of the substrate mass. This system uses carbon cloth as the electrode and the Ti-wire or Cu-wire as the wire. The optimum results were 210.25 volts/m², an electric current of 51.75 /m², and dan power density 38,91 watt/ m² obtained at 1 k Ω in 2.5% *molasses* variable using Ti-wire. This shows that the increasing external resistance does not increase electrical voltage.

Keywords: bio-electricity, external resistance, Lapindo mud, *MFCs*, molases

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Tuhan Yang Maha Esa atas segala rahmat dan karunia-Nya yang kepada kami semua. Sehingga kami dapat menyelesaikan laporan skripsi dengan judul :

“Pengaruh Eksternal Resistansi dan Penambahan *Molasses* pada Lumpur Lapindo untuk Menghasilkan Biolistrik dengan Menggunakan *Microbial Fuel Cells*”

Laporan Skripsi merupakan salah satu persyaratan yang harus dilalui mahasiswa Teknik Kimia FTI-ITS guna memperoleh gelar sarjana. Laporan skripsi ini kami susun berdasarkan aplikasi ilmu pengetahuan yang terdapat dalam literatur buku maupun data internet, khususnya di Laboratorium Pengolahan Limbah Industri Teknik Kimia FTI-ITS.

Penulis menyadari dalam penyusunan laporan skripsi ini tidak akan selesai tanpa bantuan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, pada kesempatan ini kami ingin mengucapkan terima kasih kepada :

1. Tuhan Yang Maha Esa
2. Orang tua dan keluarga atas segala kasih sayang, kesabaran, doa dan pengorbanan dalam mendidik dan membesarkan kami.
3. Bapak Dr. Eng. R. Darmawan, S.T., M.T. dan Ibu Ir. Nuniek Hendriaanie, M.T. selaku dosen pembimbing kami.
4. Bapak Juwari, S.T., M.Eng., Ph.D selaku Kepala Departemen Teknik Kimia FTI-ITS.
5. Ibu Dr. Ir. Sri Rachmania Juliastuti, M.Eng selaku kepala Laboratorium Pengolahan Limbah Industri Departemen Teknik Kimia FTI-ITS
6. Bapak/Ibu dosen penguji.
7. Seluruh dosen dan karyawan yang ada di lingkup Departemen Teknik Kimia FTI-ITS

8. Rekan-rekan di Laboratorium Pengolahan Limbah Industri yang telah memberikan saran, motivasi, serta ilmu yang tidak putus-putusnya kepada kami
9. Serta semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu- persatu yang telah banyak membantu dalam proses pengerjaan laporan skripsi ini.

Surabaya, Januari 2018

Penyusun

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	i
ABSTRAK	ii
KATA PENGANTAR.....	vi
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR TABEL	xiv
BAB I PENDAHULUAN	
I.1 Latar Belakang.....	I-1
I.2 Rumusan Masalah.....	I-3
I.3 Tujuan Penelitian	I-3
I.4 Manfaat Penelitian	I-3
I.5 Batasan penelitian	I-4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
II.1 <i>Fuel Cells</i>	II-1
II.1.1 Sejarah.....	II-1
II.1.2 Prinsip Kerja Fuel Cell	II-2
II.1.3 Jenis-Jenis Fuel Cell.....	II-2
II.2 <i>Microbial Fuel Cell</i>	II-4
II.2.1 Prinsip Kerja <i>Microbial Fuel Cells</i>	II-5
II.2.2 Perkembangan Komponen <i>MFCs</i>	II-7
II.2.3 Jenis-Jenis <i>MFCs</i>	II-9
II.2.4 Substrat dalam MFC	II-12
II.2.5 Eksternal Resistansi	II-14
II.2.6 Peralatan <i>MFCs</i>	II-14
II.2.7 Mikroba yang digunakan dalam <i>MFCs</i>	II-16
II.2.7.1 Kurva Pertumbuhan Bakteri	II-18
II.2.7.2 <i>Shewanella oneidensis</i>	II-20
II.2.7.3 <i>Escherichia coli</i>	II-21
II.2.7.4 Karakteristik Lumpur Lapindo	II-22
II.3 Penelitian Terdahulu.....	II-23
BAB III METODOLOGI PERCOBAAN	
III.1 Kondisi Operasi	III-1
III.2 Variabel Penelitian.....	III-1

III.3	Bahan Penelitian	III-2
III.4	Peralatan yang Digunakan.....	III-3
III.5	Rangkaian Peralatan <i>MFCs</i>	III-3
III.6	Prosedur Penelitian	III-3
III.7	Diagram Alir Penelitian	III-8
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN		
IV.1	Hasil.....	IV-1
IV.1.1	Hasil Perhitungan Pertumbuhan Bakteri....	IV-1
IV.1.2	Hasil Pengukuran Tegangan Listrik (V) dan Power Density (P).....	IV-3
IV.1.3	Hasil Pengukuran Jumlah Bakteri dan Power Density (P).....	IV-7
IV.2	Pembahasan	IV-7
IV.2.1	Pengaruh Eksternal Resistansi	IV-7
IV.2.2	Pengaruh Penambahan <i>Molasses</i>	IV-18
IV.2.3	Pengaruh Penambahan Nutrien MMY	IV-20
IV.2.4	Pengaruh Penambahan Dominan Bakteri ..	IV-22
IV.2.5	Degradasi BOD, COD dan TOC terhadap waktu pada proses <i>MFCs</i>	IV-26
IV.2.6	Hasil Uji SEM-EDX.....	IV-27
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN		
V.1	Kesimpulan.....	V-1
V.2	Saran	V-1
DAFTAR PUSTAKA		xvi
APPENDIKS A		A-1
LAMPIRAN		

DAFTAR GAMBAR

Gambar II.1	Deret Volta.....	II-6
Gambar II.2	<i>Single Chamber MFCs</i>	II-9
Gambar II.3	<i>Double Chamber MFCs</i>	II-10
Gambar II.4	<i>Soil Based MFCs</i>	II-11
Gambar II.5	<i>Phototrophic Biofilm PBMFCs</i>	II-11
Gambar II.6	<i>Nanoporous Membrane MFCs</i>	II-12
Gambar II.7	Klasifikasi pada bakteri berdasarkan mekanisme transfer elektron ke Elektroda.....	II-17
Gambar II.8	Kurva pertumbuhan bakteri	II-18
Gambar II.9	Bakteri <i>Shewanella oneidensis</i> MR-1	II-21
Gambar II.10	Bakteri <i>Escherichia coli</i>	II-21
Gambar III.1	Rangkaian Peralatan <i>MFCs</i>	III-3
Gambar III.2	Contoh Perhitungan <i>Haemacytometer</i>	III-7
Gambar IV.1	Pertumbuhan Bakteri <i>Shewanella oneidensis</i> MR-1	IV-1
Gambar IV.2	Pertumbuhan Bakteri <i>Escherichia coli</i>	IV-2
Gambar IV.3	Perbandingan antara jumlah bakteri dengan waktu untuk penambahan <i>molasses</i> 1,25%	IV-9
Gambar IV.4	Perbandingan antara tegangan listrik dan power density dengan waktu menggunakan variabel eksternal resistansi untuk penambahan <i>molasses</i> 1,25%	IV-9
Gambar IV.5	Perbandingan antara jumlah bakteri dengan waktu untuk penambahan <i>molasses</i> 2,5%	IV-10
Gambar IV.6	Perbandingan antara tegangan listrik dan power density dengan waktu menggunakan variable eksternal resistansi untuk penambahan <i>molasses</i> 2,5%.....	IV-11
Gambar IV.7	Perbandingan antara jumlah bakteri dengan waktu untuk penambahan <i>molasses</i> 5%	IV-12

Gambar IV.8	Perbandingan antara tegangan listrik dan power density dengan waktu menggunakan variabel eksternal resistansi untuk penambahan <i>molasses</i> 5%	IV-13
Gambar IV.9	Perbandingan antara jumlah bakteri dengan waktu menggunakan variabel eksternal resistansi untuk penambahan <i>molasses</i> 10%	IV-14
Gambar IV.10	Perbandingan antara tegangan listrik dan power density dengan waktu menggunakan variabel eksternal resistansi untuk penambahan <i>molasses</i> 10%	IV-15
Gambar IV.11	Perbandingan antara jumlah bakteri dengan waktu untuk penambahan <i>molasses</i> 15%	IV-16
Gambar IV.12	Perbandingan antara tegangan listrik dan power density dengan waktu menggunakan variable eksternal resistansi untuk penambahan <i>molasses</i> 15%	IV-17
Gambar IV.13	Perbandingan antara tegangan listrik dan power density dengan waktu untuk variabel penambahan <i>molasses</i> menggunakan eksternal resistansi 1k Ω	IV-19
Gambar IV.14	Perbandingan antara power density dan jumlah bakteri dengan waktu untuk variabel penambahan <i>molasses</i> 2,5% menggunakan eksternal resistansi 1 k Ω dengan MMY dan tanpa MMY	IV-21
Gambar IV.15	Perbandingan antara jumlah bakteri dengan waktu untuk penambahan <i>molasses</i> 2,5% menggunakan eksternal resistansi 1 k Ω	IV-24
Gambar IV.16	Perbandingan antara tegangan listrik dan power density dengan waktu untuk penambahan <i>molasses</i> 2,5% menggunakan eksternal resistansi 1 k Ω	IV-25
Gambar IV.17	Hasil Uji BOD5, COD, dan TOC variabel <i>molasses</i> 5% dengan Ti-Wire pada t0 hingga t9	IV-26
Gambar IV.18	Hasil Analisa SEM dan EDX elektroda Carbon Cloth murni, A, B, C, dan D menunjukkan hasil Analisa SEM pada perbesaran 100x, 500x, 1500x,	

	dan 3000x, E menunjukkan hasil spektrum EDX pada perbesaran 3000x.....	IV-28
Gambar IV.19	Hasil Analisa SEM dan EDX elektroda Carbon Cloth dengan variabel 5% <i>molasses</i> dengan Ti-Wire minggu ke-9, A, B, C, dan D menunjukkan hasil Analisa SEM pada perbesaran 100x, 500x, 1500x, dan 3000x. E menunjukkan hasil spektrum EDX pada perbesaran 3000x.....	IV-29
Gambar IV.20	Hasil Analisa SEM dan EDX elektroda Carbon Cloth dengan variabel 5% <i>molasses</i> dengan Tembaga minggu ke-9. A, B, C, dan D menunjukkan hasil Analisa SEM pada perbesaran 100x, 500x, 1500x, dan 3000x. E menunjukkan hasil spektrum EDX pada perbesaran 3000x.....	IV-31
Gambar IV.21	Hasil Analisa SEM dan EDX elektroda Carbon Cloth dengan variabel 5% <i>molasses</i> dengan Tembaga minggu ke-9. A, B, C, dan D menunjukkan hasil Analisa SEM pada perbesaran 100x, 500x, 1500x, dan 3000x, E menunjukkan hasil spektrum EDX pada perbesaran 3000x.....	IV-32

DAFTAR TABEL

Tabel II.1	Karakteristik jenis-jenis <i>Fuel Cells</i> II-3
Tabel II.2	Komponen pada sistem <i>MFCs</i> II-8
Tabel II.3	Pengunaan berbagai jenis substrat dan mikroorganisme pada <i>MFCs</i> II-12
Tabel II.4	Bahan material yang digunakan untuk menyusun <i>MFCs</i> II-14
Tabel II.5	Bakteri yang digunakan dalam <i>MFCs</i> II-16
Tabel II.6	Karakteristik Lumpur Lapindo II-14
Tabel II.7	Penelitian Terdahulu II-23
Tabel IV.1	Hasil pengukuran dan perhitungan V dan P pada elektroda kawat Ti-Wire dengan variabel eksternal resistansi untuk penambahan <i>molasses</i> 1,25% dan MMY IV-3
Tabel IV.2	Hasil pengukuran dan perhitungan V dan P pada elektroda kawat Ti-Wire dengan variabel eksternal resistansi untuk penambahan <i>molasses</i> 2,5% dan MMY IV-4
Tabel IV.3	Hasil pengukuran dan perhitungan V dan P pada elektroda kawat Ti-Wire dengan variabel eksternal resistansi untuk penambahan <i>molasses</i> 5% dan MMY IV-5
Tabel IV.4	Hasil pengukuran dan perhitungan V dan P pada elektroda kawat Ti-Wire dengan variabel eksternal resistansi untuk penambahan <i>molasses</i> 10% dan MMY IV-6
Tabel IV.5	Hasil pengukuran dan perhitungan V dan P pada elektroda kawat Ti-Wire dengan variabel eksternal resistansi untuk penambahan <i>molasses</i> 15% dan MMY IV-7
Tabel IV.6	Hasil pengukuran dan perhitungan jumlah bakteri dan P pada elektroda kawat tembaga

	untuk variabel <i>molasses</i> 2,5% penambahan MMY dan tanpa MMY dengan variabel eksternal resistansi $1k\Omega$	IV-8
Tabel IV.7	Hasil pengujian SEM-EDX pada carbon cloth berkawat Ti-Wire untuk penambahan <i>molasses</i> 5% dan MMY pada minggu ke-0 sampai minggu ke-9	IV-33
Tabel IV.8	Hasil pengujian SEM-EDX pada carbon cloth berkawat tembaga untuk penambahan <i>molasses</i> 5% dan MMY minggu ke-0 sampai minggu ke-9	IV-34
Tabel IV.9	Hasil pengujian SEM-EDX pada carbon cloth berkawat tembaga untuk penambahan <i>molasses</i> 5% pada minggu ke-0 sampai minggu ke-9	IV-35
Tabel IV.10	Hasil Spektrum EDX penurunan persen berat unsur pada t_0 dan t_9	IV-36

BAB I

PENDAHULUAN

I.1 Latar Belakang

Kebutuhan energi dunia terutama listrik semakin lama semakin meningkat sementara sumber energi relatif tidak bertambah. Energi berbahan fosil yang sering digunakan dalam pemenuhan energi listrik semakin lama semakin berkurang. Hal ini terjadi karena bertambahnya jumlah penduduk dan meningkatnya pemakaian. Oleh karena itu dibutuhkan sumber energi alternatif dan bersifat terus menerus. Banyak teknologi yang sedang dikembangkan untuk memenuhi kebutuhan akan energi. Salah satu teknologi yang dikembangkan adalah *Bio electrochemical systems* (BESs). BESs merupakan sebuah sistem dimana mikroorganisme berinteraksi dengan elektroda menggunakan elektron yang dilepas atau disuplai (elektron transfer) melalui sirkuit elektrik. Tipe BESs yang paling banyak digunakan adalah *microbial fuel cell* (MFCs).

Microbial fuel cells (MFCs) adalah perangkat yang mengubah energi yang tersimpan dalam ikatan kimia dalam senyawa organik menjadi energi listrik (Du Zhuwei dkk, 2008). Sistem MFCs ini akan memanfaatkan hasil dari proses metabolisme bakteri. Bakteri akan melakukan metabolisme dengan mengurai glukosa menjadi hidrogen (H_2) dan oksigen (O_2). Hidrogen merupakan bahan baku yang digunakan untuk reaksi reduksi dengan oksigen, sehingga melepaskan elektron pada anoda sebagai sumber arus listrik. Apabila dibandingkan dengan baterai yang hanya mampu mengandung material bahan bakar yang terbatas, MFCs dapat secara kontinu diisi *molasses* atau glukosa untuk diuraikan oleh bakteri menjadi bahan bakar (hidrogen). MFCs menawarkan kemungkinan – kemungkinan menghasilkan lebih dari 90 % elektron dari komponen organik dan dapat bersifat dapat diperbarui dan berkelanjutan ketika jumlah mikroorganisme meningkat dapat mengkonversi energi dari transfer elektron ke elektroda. MFCs memanfaatkan mikroba

yang dapat mengoksidasi sumber-sumber material yang rendah nilai ekonomisnya seperti sampah organik, bahan-bahan organik di tanah dan di endapan (lumpur) (Davis dan Higson, 2007).

Banjir lumpur panas Sidoarjo merupakan peristiwa menyemburnya lumpur panas di lokasi pengeboran PT. Lapindo Brantas Sidoarjo, Jawa Timur pada tanggal 27 Mei 2006. Lumpur Lapindo di Sidoarjo tersusun atas 70% air dan 30% padatan (Usman dkk, 2006). Kadar garam (salinitas) lumpur sangat tinggi (38-40 %), sehingga bersifat asin (Arisandi, 2006). Berdasarkan hasil penelitian pada parameter kimia lumpur Lapindo, diketahui bahwa nilai pH berkisar 6,6-7, kapasitas tukar kation (KTK) sebesar 3,89-35,42 (Me/100g), kadar air sebesar 40,41-60,73% dan kandungan total karbon organik sebesar 54,75-55,47% (Juniawan, 2013). Lumpur mengandung sedikit bahan organik tetapi memiliki potensi mikroba electricigens (electrogenic). Pemanfaatan bahan-bahan organik yang berasal dari lumpur Lapindo mempunyai potensi yang besar sebagai alternatif sumber energi yang bisa diperbarui dan bersifat sustain untuk menghasilkan listrik. Pada penelitian sebelumnya terdapat nilai *total organic carbon* (TOC) atau jumlah karbon yang menempel pada senyawa organik lumpur Lapindo sebesar 35,73 mg/L. Dengan melihat potensi sebagai sumber alternatif listrik di masa depan, maka pemanfaatan lumpur Lapindo dengan menggunakan *MFCs* dapat dipertimbangkan sebagai teknologi yang menjanjikan guna menghasilkan listrik (biolistrik).

Molasses merupakan sumber energi yang mengandung gula 48-56%, dengan kandungan sukrosa 30-40%, serta glukosa 4-9% (Widanarni, 2011). Gula pereduksi merupakan senyawa yang mudah dicerna dan dapat langsung diserap oleh darah untuk proses metabolisme guna memperoleh energi. Penambahan *molasses* pada lumpur dapat berguna sebagai alternatif sumber organik untuk mikroorganisme yang terdapat didalam lumpur tersebut sekaligus sebagai pemanfaatan limbah dari pabrik gula.

Berdasarkan hal-hal tersebut maka dilakukan penelitian mengenai pemanfaatan lumpur Lapindo dengan penambahan

molasses sebagai biolistrik dengan menggunakan *Microbial Fuel Cells* (MFCs).

I.2 Rumusan Masalah

Dengan memperhatikan latar belakang diatas, maka dibuat rumusan masalah sebagai berikut :

1. Bagaimana pengaruh eksternal resistansi yang terdiri dari 1 k Ω , 10 k Ω , 100 k Ω , 1000 k Ω , 5100 k Ω dan penambahan *molasses* dengan menggunakan rangkaian alat *Microbial Fuel Cells* (MFCs) dalam menghasilkan listrik menggunakan *MFCs*.
2. Bagaimana pengaruh penambahan dominan bakteri *Shewanella oneidensis* MR-1 dan *Escherichia coli* di dalam sistem *MFCs*.

I.3 Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk :

1. Mengetahui pengaruh eksternal resistansi yang terdiri dari 1 k Ω , 10 k Ω , 100 k Ω , 1000 k Ω , 5100 k Ω dan penambahan *molasses* dengan menggunakan rangkaian alat *Microbial Fuel Cells* (MFCs) dalam menghasilkan biolistrik menggunakan *MFCs*.
2. Mengetahui pengaruh penambahan dominan bakteri *Shewanella oneidensis* MR-1 dan *Escherichia coli* di dalam sistem *MFCs*.

I.4 Manfaat Penelitian

Manfaat yang diharapkan dari penelitian ini adalah :

1. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan data terkait dengan pemanfaatan lumpur Lapindo dan *molasses* untuk menghasilkan energi listrik dengan menggunakan rangkaian *MFCs*.
2. Hasil penelitian ini akan sangat membantu dalam pengembangan pemanfaatan lumpur Lapindo ke depan sebagai sumber alternatif untuk menghasilkan listrik.

3. Penggunaan jenis eksternal resistor dari 1 k Ω , 10 k Ω , 100 k Ω , 1000 k Ω , dan 5100 k Ω juga akan bermanfaat sebagai pertimbangan dalam pemilihan eksternal resistor untuk pengembangan penelitian ke depan.

I.5 Batasan Penelitian

Batasan penelitian dari penelitian ini adalah :

1. Substrat yang digunakan berasal dari lumpur Lapindo dan *molasses* dan MMY (*Minimum Medium Yeast*) yang ditambahkan sebagai nutrisi.
2. Mikroorganisme yang digunakan *indigenous bacteria* dengan penambahan dominan bakteri *Shewanella oneidensis* MR-1 dan *Escherichia coli*.
3. Penelitian ini tidak mengidentifikasi mikroorganisme yang terdapat di dalam lumpur.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

II.1 *Fuel Cell*

II.1.1 Sejarah

Teknologi *fuel cell* pertama kali ditemukan oleh Sir William Robert Grove pada tahun 1893, di mana dia mendemonstrasikan pemecahan uap menjadi hidrogen dan oksigen dengan pemanasan katalis seperti platinum. Pada masa sekarang, proses ini dinamakan teknologi reformer. Penemu teknologi *fuel cell* (Sir William) adalah seorang sarjana hukum, akan tetapi nasib mengubahnya menjadi seorang ahli fisika setelah ia jatuh sakit dan menjadi profesor fisika di sebuah institusi di London antara tahun 1840 – 1847. Kombinasi kedua disiplin ilmu itu pula yang menyebabkan ia terlibat pada penyusunan Hukum Patent di dunia komersial. Perkembangan teknologi *fuel cell* baru terasa setelah terjadi semakin pesatnya perkembangan teknologi material. Perusahaan yang sukses dalam pengembangan aplikasi ini seperti misalnya Pratt & Whitney telah berhasil mengaplikasikannya untuk misi penerbangan antariksa Gemini IV dan suksesnya pendaratan Apollo di bulan (Hasan, 2007).

Aplikasi teknologi *fuel cell* yang paling mutakhir adalah digunakannya 12 KW *fuel cell alkaline* di pesawat ulang-alik NASA. Pada *fuel cell* ini, hidrogen dan oksigen murni digunakan untuk proses konversi listrik. Sejak tahun 1970, Departemen Energi Amerika telah melakukan riset tipe *Phosphoric Acid Fuel Cell* (PAFC) untuk pembangkit listrik dan sekarang telah memasuki tahap komersialisasi. Sedangkan di Eropa, perkembangan teknologi *fuel cell* didukung oleh negara Uni Masyarakat Eropa dan berbagai pihak swasta. Demikian pula di Jepang, pengembangan teknologi *fuel cell* ini didukung oleh berbagai macam organisasi pemerintah maupun swasta (Hasan, 2007).

II.1.2 Prinsip Kerja *Fuel Cell*

Fuel cell merupakan suatu instrumen yang mengkonversi secara langsung energi kimia menjadi energi listrik. *Fuel cell* bekerja berdasarkan prinsip pembakaran listrik-kimiawi dimana akan memproduksi energi listrik arus searah, terdiri dari elektrolit yang memisahkan katoda dari anoda yang bertugas menghantar ion (Purwatil dkk, 2014). Hidrogen di dalam sel dialirkan pada sisi anoda, sedangkan oksigen dari udara dialirkan pada sisi katoda. Oksigen merupakan aseptor elektron yang paling sesuai untuk sistem *MFCs* karena potensi oksidasi yang tinggi, ketersediaan yang banyak serta biaya rendah atau gratis (Logan dkk, 2006). Pada anoda terjadi pemisahan gas hidrogen menjadi elektron dan proton (ion hidrogen). Kemudian ion hidrogen ini menyeberang bertemu dengan oksigen dan elektron di katoda dan menghasilkan air (Logan dkk, 2006). Elektron yang mengandung muatan listrik tidak bisa melewati membran, akan mengalir menuju katoda melalui jaringan eksternal. Dengan adanya aliran elektron inilah maka akan menyebabkan adanya arus listrik. Elektron-elektron bebas yang terjadi harus dialirkan keluar melalui penghantar menuju ke anoda agar proses listrik-kimiawi dapat berlangsung. Panas yang timbul dari hasil reaksi kimia harus terus menerus dibuang agar energi listrik dapat terbentuk secara kontinyu (Darmin, 2013).

II.1.3 Jenis-Jenis *Fuel Cell*

Jenis dari pada *fuel cell* ditentukan oleh material yang digunakan sebagai elektrolit yang mampu menghantar proton. Pada saat ini ada 8 jenis *fuel cell* yaitu:

- a. *Alkaline* (AFC)
- b. *Proton exchange membrane*, juga disebut *proton elektrolyt membrane* (PEM)
- c. *Phosphoric Acid* (PAFC)
- d. *Molten carbonate* (MCFC)

- e. *Solid oxide (SOFC)*
- f. *Direct methanol fuel cells (DMFCS)*
- g. *Regenerative fuel cells*
- h. *Microbial fuel cells*

Dapat diketahui bahwa masing-masing jenis *fuel cell* memiliki karakteristik yang berbeda-beda. Tabel II.1 menunjukkan perbandingan dari karakteristik jenis-jenis *fuel cell*.

Tabel II.1 Karakteristik Jenis-Jenis Fuel Cell

Jenis	Elektrolit	Suhu Operasi (°C)	Karakteristik	Penggunaan
<i>Direct Methanol Fuel Cell (DMFCS)</i>	Elektrolit Polymer (H ⁺)	60-120	Efisiensi Sistem Tinggi peka terhadap hasil oksidasi di anoda	Kendaraan
Alkaline (AFC)	KOH	60-120	Efisiensi Energi Tinggi memiliki kepekaan terhadap CO ₂	Pesawat Luar Angkasa, Kendaraan
<i>Polymer Exchange Membrane (PEM)</i>	<i>Polymer Electrolyt (H⁺)</i>	60-100	Kerapatan energi tinggi memiliki kepekaan terhadap CO (<100ppm)	Kendaraan (sedan,bis, minivan), stasiun pembangkit panas
<i>Phosporic Acid Fuel Cell (PAFC)</i>	<i>Phospor Acid (H⁺)</i>	160-200	Efisiensi Energi terbatas, peka terhadap CO (<1,5% Vol)	Stasiun Pembangkit Panas, Kendaraan
<i>Molten</i>	<i>Molten</i>	500-	Problem	Stasiun

<i>Carbonate Fuel Cell</i> (MCFC)	<i>Carbonate</i> (CO_3^{2-})	650	Korosi	Pembangkit Energi Panas, Pembangkit Energi Listrik
<i>Solid Oxyde Fuel Cell</i> (SOFC)	Lapisan Keramik (O_2)	800-1000	Efisiensi sistem tinggi, temperatur operasi perlu diturunkan	Pembangkit Energi Panas, Penggabung Stasiun pembangkit dengan turbin gas

(Hendrata Sudaha, 2001)

II.2 *Microbial fuel cells (MFCs)*

Microbial Fuel Cells (MFCs) merupakan alat untuk mengkonversi energi kimia menjadi energi listrik dengan menggunakan bakteri sebagai katalis untuk mengoksidasi bahan organik dan non organik (Logan dkk, 2006). *MFCs* umumnya menggunakan bahan organik dan karenanya sejumlah besar bahan limbah yang kaya akan kandungan organik dapat digunakan dalam *MFCs* untuk menghasilkan listrik (Rohan dkk, 2013). Berbagai mikroorganisme dapat berperan dalam *MFCs*, mulai dari yang bersifat aerob, anaerob fakultatif dan anaerob obligat (Kim dkk, 2007). Bagian utama dari rangkaian *MFCs* adalah anoda, katoda, dan peralatan elektronik. Pada kondisi aerobik MFC dipertahankan pada katoda dan anaerobik pada anoda (Rohan dkk, 2013). Sistem *MFCs* memiliki kelebihan yaitu dapat menghasilkan listrik dari sampah organik dan biomassa terbarui. Bakteri yang berperan sebagai katalis mampu beradaptasi dengan baik terhadap bahan organik berbeda yang terdapat pada limbah sehingga menghasilkan elektron. Elektron

yang dihasilkan oleh bakteri dipindahkan ke anoda (terminal negatif) dan mengalir ke katoda (terminal positif) yang dihubungkan oleh bahan konduktif yang mengandung resistor (Logan dkk, 2006).

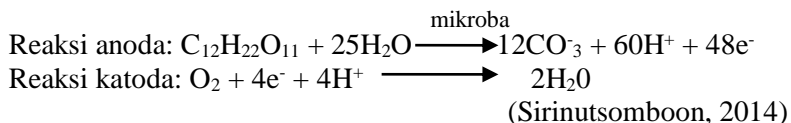
II.2.1 Prinsip Kerja Microbial Fuel Cells

Microbial fuel cells adalah metode baru untuk energi terbarukan dimana beragam biofuel bisa diubah menjadi listrik. *MFCs* adalah sebuah sistem yang mengkonversikan energi kimia yang terdapat pada substrat menjadi energi listrik dengan memanfaatkan mikroba yang melakukan metabolisme (Rohan dkk, 2013). Bakteri dapat mengkonversi berbagai macam senyawa organik menjadi CO₂, air, dan energi. Energi yang dihasilkan tersebut dimanfaatkan oleh mikroba untuk tumbuh dan melangsungkan aktivitas metabolisme. Kinerja *microbial fuel cells* dipengaruhi oleh aktivitas mikroba dan substrat yang digunakan (Lovley, 2003).

Zat hasil metabolisme mikroba biasanya senyawa yang mengandung hidrogen sehingga digunakan sebagai sumber hidrogen melalui serangkaian proses untuk menghasilkan elektron dan menghasilkan arus listrik. Aktivitas metabolisme juga melibatkan pelepasan elektron bebas dimana elektron tersebut dimanfaatkan pada katoda dalam *MFCs* untuk menghasilkan arus listrik (Madigan dkk, 1997).

Prinsip kerja dari *MFCs* adalah terdapat aliran proton dari anoda melalui membran elektrolit menuju katoda dan juga aliran elektron yang bergerak dari anoda ke katoda melalui kabel konduksi (Hoogers, 2002). Elektron yang berada di anoda dialirkan melalui sirkuit eksternal sebelum bereaksi dengan penerima elektron di katoda. Elektron yang dihasilkan dari sel mikroorganisme dipindahkan dari membran sel menuju elektroda untuk menghasilkan arus listrik. Ion-ion proton dan elektron ini akan menghasilkan beda potensial listrik sehingga menghasilkan energi (Fikri, 2011).

Elektron merupakan partikel subatomik yang bermuatan negatif dimana elektron digunakan untuk menghasilkan listrik. Dalam sistem *MFCs* terjadi metabolisme substrat organik oleh mikroorganisme dan terjadi transfer elektron ke permukaan elektroda secara ekstraseluler. Oksidasi dari material organik melepaskan elektron dan proton dari substrat yang teroksidasi. Elektron yang di transfer ke anoda kemudian di transfer ke katoda dengan melalui sebuah jaringan elektrik. Proton berpindah dari katoda kemudian bergabung dengan elektron dan katolite (oksigen) yang berkurang pada permukaan katoda. Mikroba dalam sistem *MFCs* dapat memperoleh semua karbon dan energi yang dibutuhkan untuk pertumbuhan selular dari oksidasi bahan organik kompleks (Reddy dkk, 2010). *Molasses* sebagai substrat dalam *MFCs* mengandung kadar gula 48-56% dengan kandungan sukrosa 30-40% dan glukosa 4-9% (Widanarni, 2011). Reaksi yang terjadi pada sistem *MFCs* adalah seperti berikut :



Dalam sistem *MFCs*, di dalam ruang anoda terjadi reaksi oksidasi sedangkan pada katoda terjadi reaksi reduksi. Dalam sel volta, anoda disebut elektroda negatif dan katoda adalah elektroda positif (Silberberg dan Amateis, 2015). Luigi Galvani (1780) dan Alessandro Volta (1800) menemukan terbentuknya arus listrik dari reaksi kimia. Reaksi kimia yang terjadi adalah reaksi redoks (reduksi dan oksidasi). Alat ini disebut dengan sel volta.

Li-K-Ba-Ca-Na-Mg-Al-Zn-Cr-Fe-Ni-Sn-Pb-|H|-Cu-Hg-Ag-Pt-Ti-Au

Gambar II.1 Deret Volta

Pada deret volta, unsur logam dengan potensial elektroda lebih negatif terletak di sebelah kiri dan unsur yang memiliki potensial elektroda yang lebih positif disebelah kanan. Semakin

ke kanan, logam akan semakin reaktif atau semakin mudah melepas elektron dan juga reduktor yang semakin kuat (mudah mengalami oksidasi). Semakin tinggi perbedaan potensial redoks dari substrat dan potensial anoda, semakin tinggi kemungkinan perolehan energi metabolik bakteri. Sebaliknya, semakin rendah perbedaan potensial redoks, tegangan listrik yang dapat dicapai maksimal (Logan dkk, 2006).

Tegangan listrik, arus listrik, dan power density memiliki hubungan dalam menghasilkan listrik. Sesuai dengan hukum Ohm, besar arus listrik (I) yang mengalir pada sebuah penghantar akan berbanding lurus dengan beda potensial atau tegangan listrik (V).

$$V = I \times R$$

Dengan :

V = Tegangan Listrik (Volt)

I = Arus Listrik (Ampere)

R = Resistansi (Ohm)

(Miroliaei, 2014)

Tegangan listrik dan potensial elektroda diukur secara memadai dengan multimeter dan sistem akusisi data yang tersedia secara umum yang terhubung dengan rangkaian secara paralel (Logan dkk,2006). Power density merupakan perkalian dari tegangan listrik dengan arus listrik dibagi dengan luas permukaan. Secara matematis persamaan power density ditulis sebagai berikut :

$$P = V \times I / A$$

Dengan :

P = Power density (Watt)

V = Tegangan Listrik (Volt)

I = Arus listrik (Ampere)

A = Luas permukaan elektroda (m²)

(Miroliaei, 2014)

Eksternal resistansi berhubungan dengan internal resistansi yang merupakan hambatan yang muncul karena dipengaruhi massa jenis, panjang kawat, serta luas penampang. Dimana pada penelitian oleh Campo dkk (2014) menyatakan arus dan power density dapat dihitung melalui hukum ohm yaitu

$$I = \frac{V}{R_{ext} + R_{int}}$$

$$P = I^2 \times R_{ext} = \frac{V^2}{(R_{ext} + R_{int})^2} \times R_{ext}$$

$$= \frac{V^2}{R_{int}^2 / R_{ext} + 2R_{int} + R_{ext}} \cdot R_{ext}$$

Dari rumus diatas dapat disimpulkan bahwa ketika sistem diberikan hambatan atau eksternal resistansi yang semakin besar akan berbanding terbalik dengan power density yang dihasilkan.

II.2.2. Perkembangan Komponen *MFCs*

Seperti sel bahan bakar kimia, *MFCs* terdiri dari komponen dasar seperti anoda, katoda, separator dan sirkuit eksternal. Bergantung pada aplikasinya, konfigurasi *MFC* yang berbeda telah dikembangkan seperti *single chambered* atau *double chambered*. Namun prinsip dasar untuk konfigurasi ini tetap sama.

Selama beberapa dekade terakhir beberapa kemajuan telah dilakukan untuk memperbaiki komponen *MFCs* individual untuk meningkatkan kinerja *MFC* secara keseluruhan. Pada tabel II. menunjukkan perkembangan pada komponen yang dipakai dalam sistem *MFCs*.

Tabel II.2 Komponen pada sistem *MFCs*

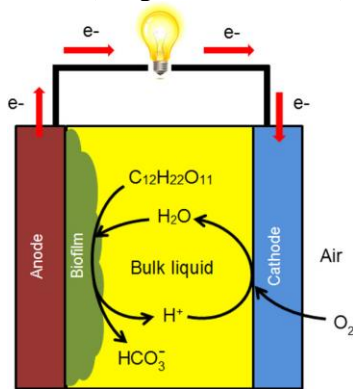
MFC Configuration	Inoculum	Material Anoda	Material Katoda	Referensi
Dual Chambered	Geobacter	<i>Graphite stick</i>	<i>Graphite stick</i>	Bond & Lovley, 2003
Single chambered	Mixed Culture	<i>Graphite plates</i>	<i>Graphite plates</i>	Chandrasekhar & Mohan, 2012
Dual Chambered	Mixed Culture	<i>Toray Carbon Paper (20% teflon)</i>	<i>Toray carbon paper (10% teflon) / Pt coated</i>	Campo dkk, 2013
Single chambered	Mixed Culture	<i>Carbon Cloth</i>	<i>Carbon cloth/ Pt</i>	Abourached dkk, 2014
Single chambered	Mixed Culture	<i>Graphite fiber brushed</i>	<i>Carbon cloth/ Pt</i>	Yang dkk, 2013
Dual Chambered	Mixed culture (MFC effluent)	<i>Graphite rod</i>	<i>Graphite rod</i>	Oh dkk, 2014
Single chambered	Mixed culture (Anaerobic sludge)	<i>Carbon Cloth</i>	<i>Carbon Cloth/ Pt</i>	Khilari dkk, 2013
Single chambered	Shewanella putrefaciens	Carbon Cloth	$\text{MnCO}_2\text{O}_4\text{-NR}_s$	Pandit dkk, 2004

II.2.3 Jenis-Jenis *MFCs*

Dalam perkembangannya, sistem *MFCs* dapat dibedakan menjadi :

II.2.3.1 *Single Chamber MFCs*

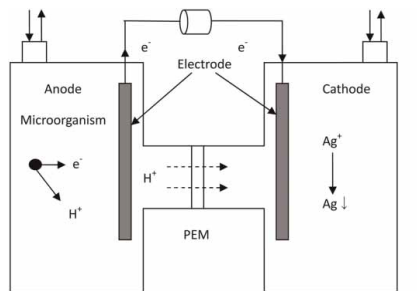
Single Chamber MFCs merupakan sistem *MFCs* dengan menggunakan satu chamber dengan elektroda didalamnya. Di dasar chamber terdapat anoda sedangkan letak katoda terdapat di permukaan chamber. *Single chamber* adalah *MFCs* yang sangat sederhana dan ekonomis (Ringeisen dkk, 2006).



Gambar II.2 *Single Chamber MFCs* (Sirinutsomboon, 2014)

II.2.3.2 *Double Chamber MFCs*

Double Chamber MFCs merupakan jenis *MFCs* dengan menggunakan dua chamber katoda dan anoda. Chamber katoda menggunakan larutan elektrolit aseptor elektron sedangkan chamber anoda digunakan sebagai pembiakan mikroba untuk menghasilkan elektron (Ringeisen dkk, 2006).

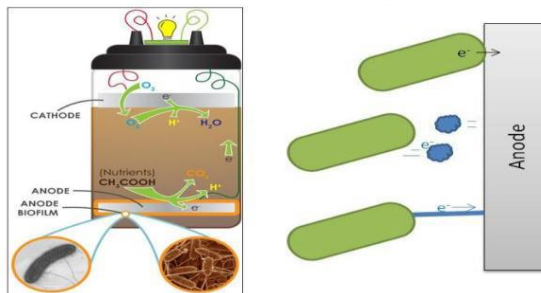


Gambar II.3 *Double Chamber MFCs* (Y. Zhang, 2013)

II.2.3.3 *Soil Based MFCs*

Soil Based MFCs atau sel bahan bakar berbasis tanah adalah sistem *MFCs* dengan memanfaatkan tanah sebagai media tumbuhnya mikroba. Anoda ditanam di dalam tanah dengan kedalaman tertentu dan katoda berada dipermukaan tanah (Xubojun dkk, 2015).

A soil-based microbial fuel cell

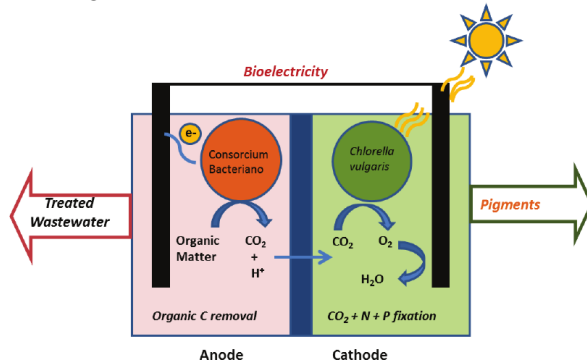


Gambar II.4 *Soil Based MFCs* (Xuboujun, 2015)

II.2.3.4 *Phototrophic Biofilm PBMFCs*

Phototrophic Biofilm PBMFCs adalah sistem *MFCs* dengan menggunakan fototrofik anoda biofilm yang mengandung mikroorganisme fotosintetik seperti *chlorophyta* *candyanophyta*.

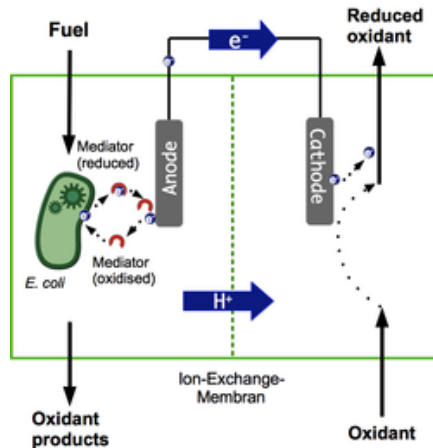
Mikroorganisme tersebut melakukan fotosintesis dengan menghasilkan metabolit organik dan menyumbang elektron. Sub-kategori fototrofik *MFCs* yang murni menggunakan bahan fotosintesis oksigen pada anoda biasanya disebutkan pada sistem fotovoltik biologis (Strik dkk, 2011).



Gambar II.5 *Phototrophic Biofilm PBMFCs* (Luisa, 2015)

II.2.3.5 *Nanoporous Membrane MFCs*

Nanoporous Membrane MFCs adalah sistem *MFCs* dengan memanfaatkan difusi pasif di dalam sel. Nilon, selulosa dan polikarbonat adalah membran filter nonporous yang biasa digunakan. Daya yang dihasilkan relatif stabil tetapi masih perlu dilakukan penelitian lanjutan (Biffinger dkk, 2007).



Gambar II.6 Nanoporous Membrane MFCs (Sunshine, 2014)

II.2.4 Substrat dalam MFCs

Dalam *Microbial fuel cells*, berbagai bentuk bahan organik dapat digunakan sebagai substrat diantaranya glukosa, pati, asam lemak, asam amino dan protein, serta air limbah dari manusia dan hewan (Idham, 2009). Tabel berikut menunjukkan percobaan *microbial fuel cells* pada berbagai jenis substrat.

Tabel II.3 Penggunaan Berbagai Jenis Substrat dan Mikroorganisme pada *Microbial Fuel Cells*

Jenis Substrat	Mikroorganisme	Referensi
Galaktosa, maltose, sukrisa, trehalosa	<i>Proteus vulgaris</i>	Kim dkk (2000)
Pati (starch)	<i>Clostridium butyricum</i> atau <i>C. Beijerinckii</i>	Niessen dkk (2004)
Asetat	<i>E. coli</i> , <i>Shwanella oneidensis</i> , <i>Geobacter sulfurreduces</i>	Park dkk (2000), Debabov (2008)
Rumen sapi	<i>E. coli K12</i>	Liu dkk (2004)

Glukosa	<i>Rhodoferrax ferrireducens</i>	Chaudhuri da Lovley (2003)
---------	----------------------------------	----------------------------

(Idham, 2009)

Molasses adalah buangan akhir proses pengolahan gula setelah mengalami kristalisasi berulang dan berwarna coklat kehitaman serta berbentuk cairan kental (M. Wijaya, 2016). *Molasses* memiliki harga murah dan masih mengandung gula 48-56%, dengan kandungan sukrosa 30-40%, serta glukosa 4-9% (Widanarni, 2011). Air limbah dari penyuling berbasis *molasses* dapat berpotensi menjadi substrat untuk MFC. Efisiensi dan kinerja dari *microbial fuel cells* dipengaruhi oleh berbagai faktor seperti kecepatan degradasi substrat, kecepatan transfer elektron bakteri ke katoda, dan transfer proton dalam larutan (Liu dkk, 2004). Kinerja *microbial fuel cells* dipengaruhi oleh aktivitas mikroba dan substrat yang digunakan (Lovley, 2003).

II.2.5 Eksternal Resistansi

Eksternal resistansi secara langsung mempengaruhi potensial dan arus di anoda dan hal tersebut mempengaruhi variabel lain dalam sistem *MFCs* seperti morfologi biofilm, power density yang dihasilkan, stabilitas *MFCs*, jumlah mikroorganisme dan variabel lainnya. Oleh karena itu, pemilihan eksternal resistansi untuk mendapatkan performa terbaik dalam *MFCs* sangat penting (Campo, 2014).

Dalam sistem *MFCs* menggunakan eksternal resistansi, bakteri electrogenic diperkaya dengan kerapatan arus yang lebih tinggi yaitu beban eksternal rendah dan mampu mempertahankan kualitas arus dan efluen yang lebih baik. Ketika *MFCs* menggunakan eksternal resistansi, kualitas efluen meningkat seiring arus yang mengalir pada *MFCs* dan sejumlah besar bahan organik dikonsumsi oleh bakteri elektroaktif untuk mendorong proses tersebut. Pemberian eksternal resistansi yang berbeda-beda memberi pengaruh terhadap kecepatan transfer electron dan juga

terhadap aktifitas metabolisme mikroba tersebut. (Katuri dkk, 2011).

Pada penelitian ini juga menggunakan beberapa variabel eksternal resistansi yaitu 1 k Ω , 10 k Ω , 100 k Ω , 1000 k Ω , dan 5100 k Ω . Penggunaan beberapa variabel eksternal resistansi bertujuan untuk mencari kondisi optimum dalam *MFCs* menghasilkan listrik.

II.2.6 Peralatan *MFCs*

Peralatan *MFCs* terdiri dari chamber, katoda dan anoda. Komponen dan material penyusun *MFCs* ditunjukkan pada Tabel II.4 berikut ini :

Tabel II.4 Bahan Material yang digunakan untuk menyusun *MFCs*

Item	Bahan Material
Anoda	<i>Graphite, graphite felt, carbon paper, carbon-cloth, Pt, Pt black, RVC</i>
Katoda	<i>Graphite, graphite felt, carbon paper, carbon-cloth, Pt, Pt black, RVC</i>
Anoda Chamber	<i>Glass, polycarbonate, Plexiglas</i>
Katoda Chamber	<i>Glass, polycarbonate, Plexiglas</i>
Proton Exchange System	<i>Proton exchange membrane: Nafion, Ultrex, polyethylene.poly, (styrene-codivinylbenzene); salt bridge, porcelain septum, atau solely electrolyte</i>
Electrode catalyst	<i>Pt, Pt black, MnO₂, Fe³⁺, polyaniline, mediator elektron immobilized pada anode</i>

Elektroda yang digunakan dalam sistem *MFCs* harus bersifat konduktif, *biocompatible* (sesuai dengan makhluk hidup) dan secara kimia bersifat stabil di dalam larutan bioreaktor. Bahan elektroda yang paling bermanfaat adalah karbon dalam bentuk lempeng grafit (padat, batang, ataupun granula), dalam bentuk bahan berserat dan berbentuk *glass carbon* (Logan dkk,

2006). Karbon adalah salah satu bahan yang dapat digunakan sebagai elektroda secara efektif dan tersedia dalam berbagai struktur dan luas permukaan yang sesuai di *MFCs*. Karbon dapat digunakan dalam semua tipe *MFCs* karena fleksibilitasnya dalam ukuran dan bentuk. Selain itu, biaya untuk elektroda karbon lebih murah (Arungovind dkk, 2017) Carbon cloth yang digunakan memiliki stabilitas kimia yang baik, tekstur jaringan berpori 3D (Shuang Xi dkk, 2017). Kabel tembaga digunakan sebagai kontak dengan elektroda dan bidang kontak dilapisi dengan hati-hati dengan bahan epoksi untuk menghindari terjadinya korosi.

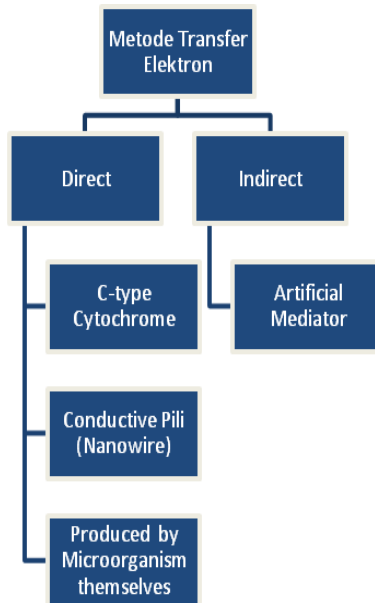
II.2.7 Mikroba yang digunakan dalam *MFCs*

Bakteri *electrogen* atau elektrolitik ditemukan di banyak lingkungan anaerob, termasuk endapan pada sungai, danau dan lautan (Nunez,). Dalam menghasilkan listrik bakteri bergantung pada alkalinitas, temperatur, ketersediaan nutrisi, dan jenis *acceptor* elektron (Pandit & Das, 2018). Pada tabel menunjukkan beberapa jenis bakteri yang dapat digunakan dalam sistem *MFCs*.

Tabel II.5 Bakteri yang digunakan di *MFCs*

<i>Biocatalysts Pure culture</i>	<i>Electron Donor</i>	<i>MFC type</i>	<i>Power Density (mW.m²)</i>	Referensi
<i>Escherichia coli</i>	Complex medium	Single chamber	600	Zhang dkk (2006)
<i>Shewanella oneidensis</i>	Lactate	Miniature	3000	Ringeisen dkk (2006)
<i>Geobacter sulfurreducens</i>	Acetate	H-type	13	Bond dan Lovely (2003)
<i>Rhodospirillum rubrum</i>	Glucose	H-type	33,4	Chaudhuri dan Lovely(2003)
<i>Clostridium isolates</i>	Complex medium	Two-chamber	n.a.	Prasad dkk (2006)

(Pandit & Das, 2018)



Gambar II.7 Klasifikasi pada bakteri berdasarkan mekanisme transfer elektron ke elektroda

Mikroba di MFC berperan sangat penting. Mekanisme transfer elektron dikelompokkan menjadi dua jenis yaitu *indirect* dan *direct*. Pada mekanisme *indirect*, mikroba memerlukan beberapa bentuk mediator untuk transfer elektron ke anoda yang dapat diperoleh dari luar.

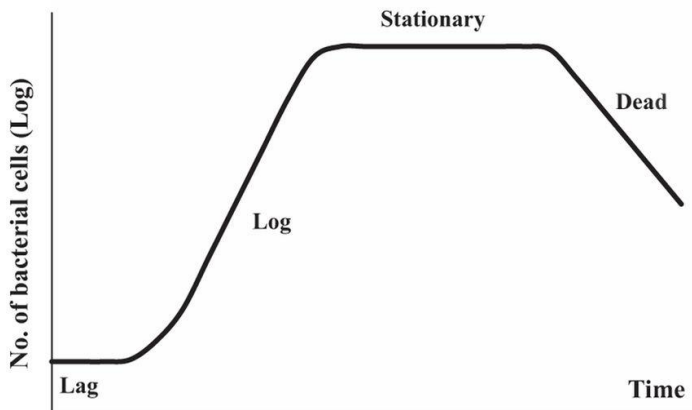
Di sisi lain, mekanisme *direct*, mikroba dapat menyumbangkan elektron langsung ke anoda yang dikenal sebagai bakteri elektroaktif. Mereka juga dikenal sebagai anodofil atau *exoelectrogen* dan mampu membentuk biofilm konduktif pada anoda. *C-type cytochromes* (CTCs) memainkan peran paling berguna dalam teknik transfer elektron untuk menghasilkan listrik. *C-type cytochromes* pada dasarnya adalah protein heme

yang tersebar luas yang tersedia di sebagian besar *archaea* dan *eubacteria*. Teknik mikrobial atau bakteri nanowire dianggap sebagai cara baru untuk mentransfer elektron ke elektroda. Nanowire bakteri adalah pili elektrik yang konduktif yang ditemukan sambil mengurangi Fe (III) oksida oleh *G.sulfurreducens* (Pandit & Das, 2018).

Shewanella sp. dan *Escherichia coli* adalah dua contoh mikroorganisme dimana bakteri awal dapat menyumbangkan elektron langsung ke akseptor elektron yang tidak larut sementara bakteri akhir membutuhkan mediator buatan untuk mentransfer elektron secara tidak langsung ke anoda (Miroliaei dkk, 2014).

II.2.7.1 Kurva Pertumbuhan Bakteri

Pertumbuhan sel bakteri biasanya mengikuti suatu pola pertumbuhan tertentu berupa kurva pertumbuhan bakteri yang terlihat pada Gambar II. 4 .



Gambar II.8 Kurva Pertumbuhan Bakteri (Wang dkk, 2015)

Kurva pertumbuhan adalah suatu informasi mengenai fase hidup suatu bakteri yang digunakan untuk mengetahui kecepatan pertumbuhan sel dan pengaruh lingkungan terhadap kecepatan pertumbuhan. Langkah awal untuk mengetahui kurva pertumbuhan bakteri adalah dengan isolasi bakteri.

Pembuatan kurva pertumbuhan bakteri merupakan bagian penting dalam suatu penelitian karena menggambarkan karakteristik kolonisasi bakteri. Perhitungan waktu generasi diperlukan untuk mengetahui prediksi populasi setiap mikroorganisme dalam jangka waktu yang sama dengan keaktifannya dalam proses metabolisme. (Sharah dkk, 2015)

Kurva pertumbuhan bakteri dapat dipisahkan menjadi empat fase utama yaitu fase lag (fase lamban atau *lag phase*), fase pertumbuhan eksponensial (fase pertumbuhan cepat atau *log phase*), fase stationer (*stationary phase*) dan fase penurunan populasi atau kematian (*decline*). Fase-fase tersebut mencerminkan keadaan bakteri dalam kultur pada waktu tertentu. Di antara setiap fase terdapat suatu periode peralihan dimana waktu dapat berlalu sebelum semua sel memasuki fase yang baru.

- Fase Lag
Fase ini, ditandai dengan peningkatan komponen makromolekul, aktivitas metabolik, dan kerentanan terhadap zat kimia dan faktor fisik. Selama fase lag bakteri tidak menunjukkan pertumbuhan - meskipun sel meningkat dalam ukuran - namun mulai mempersiapkan reproduksi sintesis DNA dan enzim seluler tersebut (Garbutt 1997).
- Fase log / pertumbuhan eksponensial.
Pada fase eksponensial atau logaritmik, sel berada dalam keadaan pertumbuhan dimana laju pertumbuhan lebih besar daripada laju kematian. Selama fase log, biomassa bakteri meningkat secara linear seiring waktu, dengan jumlah sel bakteri dua kali lipat dengan setiap satuan waktu. Fase ini didefinisikan sebagai tahap pertumbuhan yang seimbang karena komposisi rata-rata sel tetap konstan dengan sifat kultur bakteri (yaitu, protein dan DNA) yang meningkat pada tingkat yang sama.

- Fase stasioner.
Tidak ada lagi peningkatan pada jumlah sel bakteri yang dapat bertahan dan aktivitas metabolik seluler menurun sehingga tingkat pertumbuhannya sama dengan tingkat kematian. Selama fase ini laju pertumbuhan sama dengan laju kematian, fase stasioner tercapai.
- Fase penurunan populasi atau fase kematian.
Pada saat medium kehabisan nutrisi maka populasi bakteri akan menurun jumlahnya. Pada saat ini jumlah sel yang mati lebih banyak daripada sel yang hidup.
(Al-qadiri dkk, 2007)

II.2.7.2 *Shewanella oneidensis*

Shewanella putrefaciens atau *Shewanella oneidensis* MR-1 merupakan bakteri anaerob fakultatif yang ditemukan dalam bentuk endapan (Perry dkk., 1993). Bakteri ini memiliki beberapa karakter khusus seperti mampu menangkap elektron dalam kondisi kekurangan oksigen dan mampu bertahan hidup di berbagai macam habitat (Gralnick dkk, 2007). *Shewanella* terkenal untuk keragaman terminal penangkap elektron dimana bakteri ini dapat mereduksi dan merupakan salah satu keluarga primer dari bakteri yang digunakan dalam *MFCs* (Logan dkk, 2006). *Shewanella* memiliki beberapa aplikasi dalam bidang bioteknologi yaitu sebagai akseptor elektron yang berguna dalam *Microbial Fuel Cell (MFCs)* dan Bioremediasi dari radionuklida dan limbah dasar *toxic* (Gralnick dkk, 2007).

Berdasarkan taksonominya *Shewanella oneidensis* diklasifikasikan sebagai berikut :

Kingdom	: <i>Bacteria</i>
Divisio	: <i>Proteobacteria</i>
Kelas	: <i>Gamma Proteobacteria</i>
Ordo	: <i>Alteromonadales</i>
Famili	: <i>Shewanellaceae</i>
Genus	: <i>Shewanella</i>

Nama Binomial : *Shewanella oneidensis*



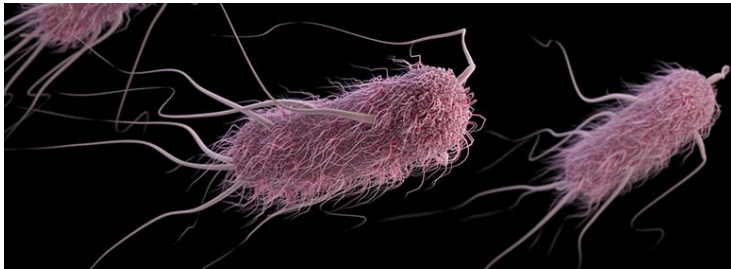
Gambar II.9 Bakteri *Shewanella oneidensis* MR-1

II.2.7.3 *Escherichia coli*

Escherichia coli adalah bakteri gram negatif berbentuk batang pendek yang memiliki panjang sekitar 2 μm , lebar 0,4-0,7 μm , dan diameter 0,7 μm . Bakteri yang bersifat anaerob fakultatif ini tergolong bakteri mesofilik yaitu bakteri yang suhu pertumbuhan optimumnya 15-45°C. Bakteri ini memiliki suhu maksimum pertumbuhan 40-45°C, diatas suhu tersebut bakteri akan mengalami inaktivasi (Hawa dkk, 2011).

Berdasarkan taksonominya *Escherichia coli* diklasifikasikan sebagai berikut :

Kingdom	: <i>Bacteria</i>
Divisio	: <i>Proteobacteria</i>
Kelas	: <i>Gamma Proteobacteria</i>
Ordo	: <i>Enterobacteriales</i>
Famili	: <i>Enterobacteriaceae</i>
Genus	: <i>Escherichia coli</i> .



Gambar II.10 Bakteri *Escherichia coli*

II.2.7.4 Karakteristik Lumpur Lapindo

Lumpur, bahan yang tampaknya tak bernyawa dan tidak menarik, sebenarnya bisa digunakan untuk menghasilkan listrik dengan menggunakan bakteri. Ketika bakteri mengkonsumsi zat organik dalam kondisi kekurangan oksigen, seperti yang ditemukan di lumpur, mereka menghasilkan CO², proton dan elektron (Nunez).

Lumpur panas Sidoarjo merupakan hasil luapan semburan lumpur di daerah Porong, Sidoarjo. Luapan lumpur panas Sidoarjo terletak pada 10 km timur laut dari Gunung Penanggungan, didekat sumur eksplorasi Banjarpanji-1, di Desa Reno Kenongo, Kecamatan Porong, Kabupaten Sidoarjo, Jawa Timur. Lumpur Lapindo di Sidoarjo tersusun atas 70% air dan 30% padatan (Usman E., 2006). Kadar garam (salinitas) lumpur sangat tinggi (38-40 %), sehingga bersifat asin (Arisandi, 2006).

Berdasarkan analisis karakteristik dari lumpur Lapindo, diperoleh hasil yang ditunjukkan pada Tabel II.6 (Alvin Juniawan, 2013).

Tabel II.6 Karakteristik Lumpur Lapindo

No	Parameter	Hasil
1	Fisik :	
	- Berat jenis (cm/cm ³)	1,25 – 2,35
2	Kimia :	

	- Ph	6,6 - 7
	- KTK (NH ₄ OAC 1 N pH 7) (me/100g),	3,89-35,42
	- Pb (mg/L)	0,19-0,34
	- Cu (mg/L)	0,19-0,85
	- Kadar air (%)	40,41-60,7
	- C-Organik total (%)	54,75-55,47

(Juniawan, 2013)

II.3 Penelitian Terdahulu

Penelitian terdahulu mengenai ditunjukkan pada Tabel

II.7

Tabel II.7 Penelitian Terdahulu

Nama Peneliti	Hasil Penelitian
Krishna P. Katuri dkk, 2011	Penelitian dengan judul ” Microbial fuel cells meet with external resistance” dihasilkan bahwa perbedaan eksternal resistansi dapat menyebabkan bebrapa perbedaan yang signifikan pada operasi MFC. Diantara eksternal resistansi yang digunakan, 0,1 k Ω menghasilkan arus paling besar yaitu 273,61 mA/m ²
Mohammad Reza Miroliaei dkk, 2015	Penelitian dengan judul “Kinetics Investigation of Diversity Cultures of <i>E.coli</i> and <i>Shewanella sp.</i> and Their Combined Effect with Mediator on MFC Performance” dihasilkan <i>power density</i> untuk <i>E.coli</i> dengan konsentrasi mediator MB 0,025 dihasilkan <i>power density</i> sebesar 46,14 mW/m ² , dengan <i>Shewanella sp.</i> tidak ditambahkan dengan MB menghasilkan 26,91 mW /m ² , dan untuk campuran kedua bakteri dengan konsentrasi MB 0,01 dihasilkan 24,88 mW/m ² .
Arungovind. M dkk, 2017	Penelitian dengan judul “analysis of microbial fuel cell for energy harvesting with waste water and molasses” disimpulkan bahwa substrat dari berbagai sumber seperti limbah ternak, molasses, air pencuci

	beras, dan limbah cair industri, secara individu dan juga dalam kombinasi dapat digunakan dalam sel MFC untuk menghasilkan listrik. Dengan hasil tegangan listrik pada campuran air cucian beras dan molasses sebesar 222 mV pada 60 jam waktu operasi.
Hudha dan Ibnu, 2017	Penelitian yang berjudul “pemanfaatan lumpur Lapindo sebagai biolistrik dengan menggunakan <i>Microbial Fuel Cells</i> (MFCs)” dihasilkan tegangan listrik pada elektroda Ti 100 mesh dengan MMY sebesar 86,63 V/m ² dan tegangan listrik pada elektroda 100 mesh tanpa MMY sebesar 65,50 V/m ² . Dari hasil penelitian dapat disimpulkan bahwa potensi energi listrik yang dihasilkan dengan penambahan nutrisi MMY lebih besar daripada tanpa MMY.
Dessy Rosita Sari dan Chanifah Hidayat, 2016	Penelitian yang berjudul “Studi pemanfaatan lumpur sebagai sumber alternatif energi dengan menggunakan <i>microbial fuel cells</i> ” disimpulkan bahwa potensial energi listrik yang dihasilkan dengan penambahan MMY adalah yang paling baik diantara nutrisi MM, MSM, dan MSMY.

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

III.1 Kondisi Operasi

Kondisi operasi yang digunakan:

1. Berat total lumpur : 1 kg
2. Suhu : 30 °C (suhu kamar)
3. Tekanan : 1 atm
4. pH : 7 – 8
5. Ketinggian penanaman : Anoda : 3 cm dan 5 cm dari dasar
6. Ukuran elektroda : 2 cm x 5 cm

III.2 Variabel Penelitian

Variabel Penelitian terdiri dari:

1. Jenis Eksternal Resistor
 - a. Eksternal Resistor 1 k Ω
 - b. Eksternal Resistor 10 k Ω
 - c. Eksternal Resistor 100 k Ω
 - d. Eksternal Resistor 1000 k Ω
 - e. Eksternal Resistor 5100 k Ω
2. Jenis Medium
 - a. Lumpur Lapindo+ *Molasses* 1,25 % +MMY
 - b. Lumpur Lapindo+ *Molasses* 2,5 % +MMY
 - c. Lumpur Lapindo + *Molasses* 5 % +MMY
 - d. Lumpur Lapindo + *Molasses* 10 % +MMY
 - e. Lumpur Lapindo + *Molasses* 15 % +MMY
3. Jenis bakteri dominan yang ditambahkan pada eksternal resistor dan medium terbaik dengan jumlah 10^{11} - 10^{12} cells/ml adalah
 - a. *Shewanella oneidensis MR-1*
 - b. *Escherichia coli*
4. Waktu Penanaman
Lama penanaman elektroda di dalam medium dilakukan selama : 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, dan 9 minggu

III.3 Bahan Penelitian

Bahan yang digunakan untuk penelitian terdiri dari

III.3.1 Bahan Pembuatan Elektroda

1. *Carbon cloth*
2. Ti-Wire (konektor)
3. Tembaga (konektor)
4. Resin (coating)
5. Lem

III.3.2 Bahan Pembuatan Rangkaian Eksternal Resistansi

1. PCB
2. Eksternal resistansi (1k Ω , 10 k Ω , 100 k Ω , 1000 k Ω , 5100 k Ω)

III.3.3 Bahan Pembuatan MMY (Minimum Medium + Yeast)

1. NH₄NO₃
2. KH₂PO₄
3. K₂HPO₄.3H₂O
4. MgSO₄.7H₂O
5. FeCl₃.6H₂O
6. CaCl₂
7. Aquadest
8. Ekstrak yeast & Glukosa
9. NaOH

III.3.4 Bahan Pembuatan Media Bakteri LB Broth

1. Pepton
2. NaCl
3. *Yeast Extract*
4. Aquadest

III.3.5 Bahan Pembuatan NaCl 0,3 M

1. Aquadest
2. NaCl

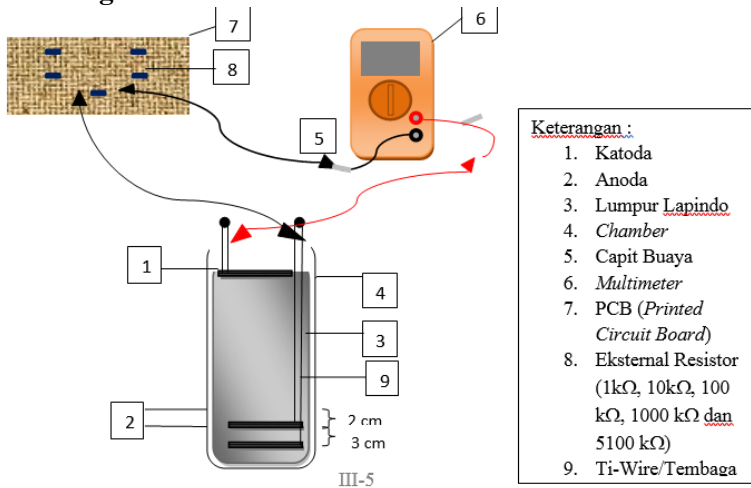
III.3.6 Bahan Pembuatan NaOH 1N

1. Aquadest
2. NaOH

III.4 Peralatan yang Digunakan

1. *Chamber*
2. Solder
3. *Beaker glass*
4. Spatula
5. Tabung Reaksi
6. Mikroskop
7. Erlenmeyer
8. Soil Test
9. Oven
10. Timbangan Digital
11. Alat *Multimeter*

III.5 Rangkaian Peralatan *MFCs*



III.6 Prosedur Penelitian

Pada penelitian ini memiliki prosedur penelitian yang terdiri dari tahap persiapan, tahap penanaman elektroda pada *chamber*, tahap pengukuran dan analisa.

III.6.1 Tahap Persiapan

III.6.1.1 Tahap Penyusunan Elektroda

1. Ti-wire diukur 15 cm sebanyak 20 buah untuk Katoda
2. Ti-wire diukur 28 cm sebanyak 5 buah untuk Anoda A
3. Ti-wire diukur 30 cm sebanyak 5 buah untuk Anoda B
4. Carbon cloth dipotong 2 cmx5 cm sebanyak 20 buah
5. Ti-wire dan carbon cloth disatukan dengan menganyam
6. Dilakukan pengulangan tahap 1 sampai 4 pada kawat tembaga
7. kawat tembaga direkatkan pada carbon cloth dengan lem besi

III.6.1.2 Tahap Pembuatan Larutan NaCl 0,3 M

1. NaCl dilarutkan 17,55 gr ke dalam 1000 ml aquadest

III.6.1.3 Tahap Pemasangan Resistor ke PCB

1. Eksternal resistor 1 k Ω , 10 k Ω , 100 k Ω , 1000 k Ω , 5100 k Ω disolder pada PCB

III.6.1.4 Tahap Pembuatan Medium

a. Variabel I

1. Lumpur lapindo ditimbang 987,5 gram
2. *Molasses* ditimbang 12,5 gram
3. Membuat Larutan NaOH 1N
4. Larutan NaOH 1 N 3,67 ml ditambahkan ke dalam 12,5 gram *molasses*
5. Campuran *Molasses* disterilisasi
6. Lapindo dicampur dengan campuran *Molasses*

b. Variabel II

1. Lumpur lapindo ditimbang 975 gram
2. *Molasses* ditimbang 25 gram
3. Membuat Larutan NaOH 1N
4. Larutan NaOH 1 N ml ditambahkan ke dalam 25 gram *molasses*
5. Campuran *Molasses* disterilisasi
6. Lapindo dicampur dengan campuran *Molasses*

c. Variabel III

1. Lumpur lapindo ditimbang 950 gram
2. *Molasses* ditimbang 50 gram
3. Membuat Larutan NaOH 1N

4. Larutan NaOH 1 N 14,7 ml ditambahkan ke dalam 50 gram *molasses*
5. Campuran *Molasses* disterilisasi
6. Lapindo dicampur dengan campuran *Molasses*

d. Variabel IV

1. Lumpur lapindo ditimbang 900 gram
2. *Molasses* ditimbang 100 gram
3. Membuat Larutan NaOH 1N
4. Larutan NaOH 1 N 30,25 ml ditambah ke dalam 100 gram *molasses*
5. Campuran *Molasses* disterilisasi
6. Lumpur Lapindo dicampur dengan campuran *Molasses*

e. Variabel IV

1. Lumpur lapindo ditimbang 850 gram
2. *Molasses* ditimbang 150 gram
3. Membuat Larutan NaOH 1N
4. Larutan NaOH 1 N 46,5 ml ditambah ke dalam 150 gram *molasses*
5. Campuran *Molasses* disterilisasi
6. Lumpur Lapindo dicampur dengan campuran *Molasses*

III.6.1.5 Tahap Pembuatan Media Bakteri LB Broth

1. Pepton ditimbang 10 gram
2. NaCl ditimbang 10 gram
3. *Yeast extract* ditimbang 5 gram
4. 1 liter aquadest dipanaskan sampai mendidih
5. Pepton, NaCl, dan *yeast extract* ditambahkan sedikit demi sedikit ke dalam aquadest

III.6.1.6 Tahap Pembuatan MMY (Minimum Medium Yeast)

1. NH_4NO_3 dan KH_2PO_4 ditimbang masing-masing 1 gram
2. $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ dan $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ditimbang masing-masing 0,1 gram
3. $\text{K}_2\text{HPO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ditimbang 1,3 gram
4. CaCl_2 ditimbang 0,008 gram
5. Semua bahan dilarutkan ke dalam 1 liter aquadest

6. Media ditambah dengan 0,1% (w/v) dari ekstrak yeast dan glukosa
7. Media di tambahkan larutan NaOH 0,5 mol/L hingga mencapai akhir yaitu pH 7
8. Media yang telah dibuat disterilkan menggunakan autoklaf dengan suhu 121⁰C dan 15 psig selama 15 menit.

III.6.2. Tahap Penanaman Elektroda pada Chamber

1. Carbon cloth dicelupkan pada larutan NaCL 0,3 M
2. Ke-dua anoda (anoda dan b) dipasang pada chamber dengan ketinggian 3 cm dan 5 cm dari dasar chamber
3. Variabel I dimasukkan pada chamber
4. Ke-dua katoda dipasang pada ketinggian dimana carbon cloth menyentuh permukaan lumpur
5. Dilakukan pengulangan tahan 1 sampai 4 pada variabel II, variabel III, variabel IV, dan variabel V

III.6.3 Tahap Pengukuran dan Analisa

Pada tahap analisa ini dilakukan dengan mengukur dan menghitung parameter-parameter sebagai berikut :

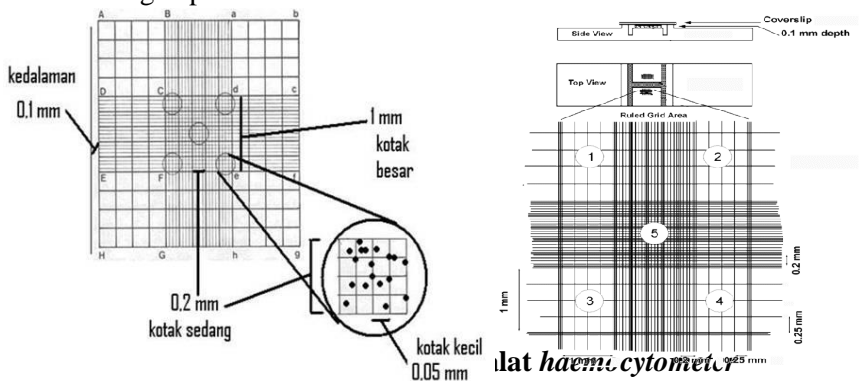
a. Potensi Listrik

1. Mempersiapkan alat *Multimeter* untuk mengukur tegangan (V) dan arus listrik (I).
2. Eksternal Resistor dihubungkan pada alat *Multimeter* dan katoda/anoda dengan konektor (capit buaya)
3. Setelah semua rangkaian terhubung dengan alat pengukur, maka proses pengukuran bisa dimulai
4. Hasil pengukuran didapatkan saat angka pada alat ukur stabil

b. Analisa Jumlah Bakteri

1. Sampel tanah sebanyak 1 gram ditimbang.
2. Sampel diencerkan di dalam tabung reaksi dengan penambahan aquades hingga 10 ml (pengenceran 10 kali)
3. Lakukan pengenceran sesuai dengan tingkat pengenceran yang diinginkan.
4. Sampel diambil 1 tetes dengan menggunakan pipet tetes untuk ditetaskan diatas permukaan *haemocytometer*.

5. Kemudian *haemocytometer* diletakkan dibawah lensa mikroskop untuk dihitung jumlah selnya.
6. Pengamatan dilakukan dengan menggunakan mikroskop dengan pembesaran 400x.



Cara perhitungan populasi bakteri :

- a. Hitung jumlah sel yang terlihat di masing-masing bagian hemocytometer
- b. Hitung volume kotak :

$$\begin{aligned}\text{Volume kotak} &= \text{luas kotak} \times \text{kedalaman kotak} \\ &= 0,04 \text{ mm}^2 \times 0,1 \text{ mm} \\ &= 0,004 \text{ mm}^3\end{aligned}$$

- c. Hitung jumlah sel per mm^3 dengan rumus :

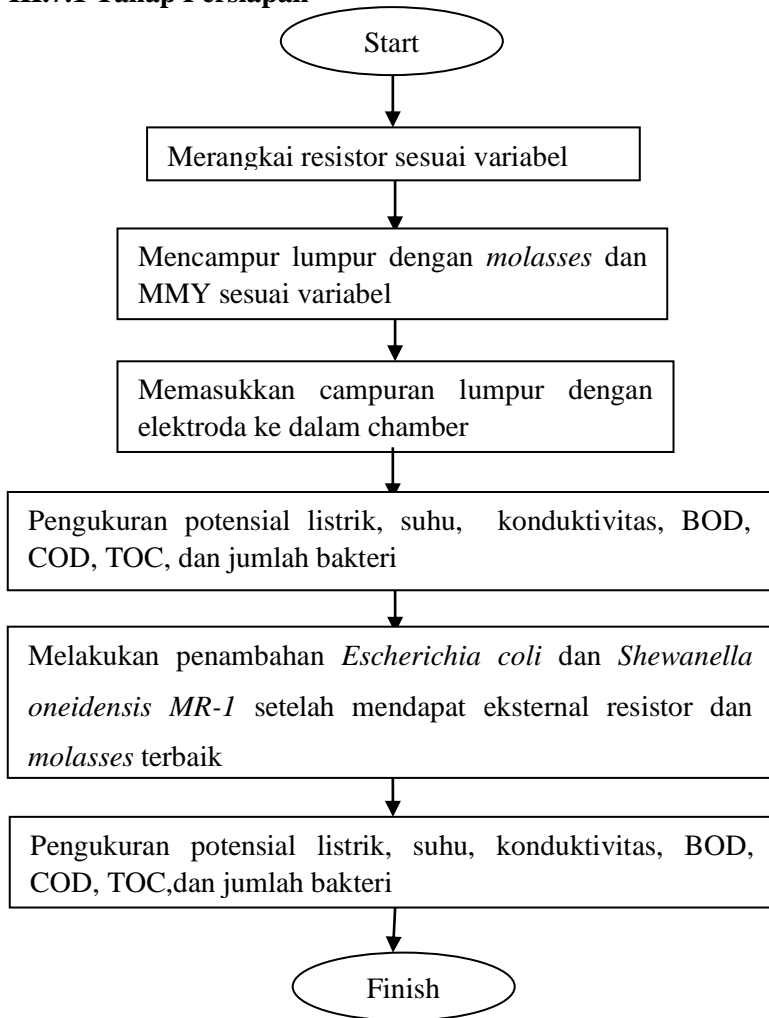
$$\text{Jumlah sel per mm}^3 = \frac{\text{jumlah sel/kotak}}{\text{volume kotak (mm}^3\text{)}} \times \text{konversi}$$

- d. Hitung jumlah sel sebenarnya :

$$\text{Jumlah sel sebenarnya} = \text{jumlah sel per mm}^3 \times \text{faktor pengenceran}$$

III.7 Diagram Alir Penelitian

III.7.1 Tahap Persiapan



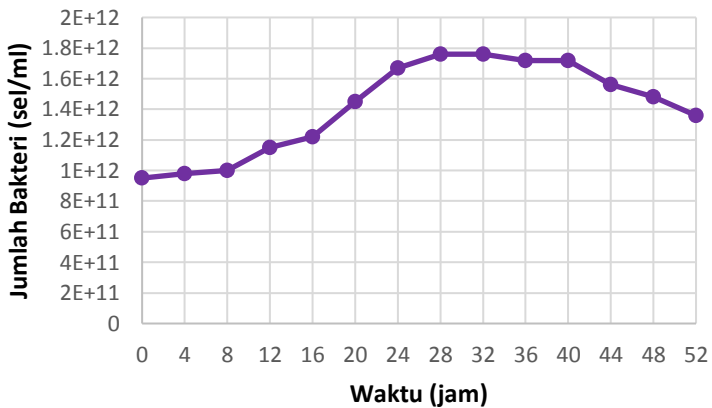
BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

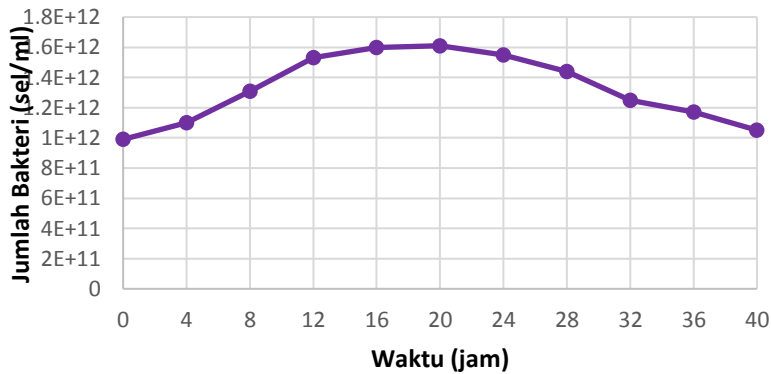
IV.1 Hasil

IV.1.1 Hasil Perhitungan Pertumbuhan Bakteri

Pada penelitian ini, fase pertumbuhan kedua jenis dominan bakteri yang ditambahkan pada chamber bioreaktor adalah *Shewanella oneidensis* MR-1 dan *Escherichia coli* ditunjukkan pada Gambar IV.1 dan IV.2.



Gambar IV.1 Pertumbuhan Bakteri *Shewanella oneidensis* MR-1



Gambar IV.2 Pertumbuhan Bakteri *Escherichia coli*

Pada Gambar IV.1 menunjukkan fase adaptasi pada jam ke-0 hingga ke-16 sedangkan fase log bakteri terjadi pada jam ke-16 hingga jam ke-24. Pada jam ke-24 hingga jam ke-40, pertumbuhan bakteri mencapai fase stasioner selanjutnya pada jam ke-44 terjadi fase kematian dimana jumlah bakteri mulai mengalami penurunan. Pada Gambar IV.2 menunjukkan fase adaptasi di mulai dari jam ke-0 sampai jam ke-4 sedangkan fase log bakteri terjadi pada jam ke-4 hingga jam ke-12. Kemudian bakteri mengalami fase stasioner pada jam ke-12 hingga jam ke-20. Pada jam ke-24 terjadi fase kematian dimana jumlah bakteri mulai mengalami penurunan. Pada saat bakteri aktif bermetabolisme, diharapkan akan ada banyak elektron dan proton yang dihasilkan sehingga biolistrik meningkat. Maka dari itu kedua dominan bakteri dimasukkan ke dalam reaktor setelah 16 jam inkubasi untuk bakteri *Shewanella oneidensis* MR-1 dan setelah 8 jam inkubasi untuk penambahan dominan bakteri *Escherichia coli* dimana fase log sedang terjadi.

IV.1.2 Hasil Pengukuran Tegangan Listrik (V) dan Power Density (P)

Hasil pengukuran tegangan listrik dan power density ditunjukkan pada Tabel IV.1 sampai IV.5.

Tabel IV.1 Hasil pengukuran dan perhitungan V dan P pada elektroda kawat *Ti-Wire* dengan variabel eksternal resistansi untuk penambahan *molasses* 1,25% dan MMY

Eksternal Resistansi Waktu (Minggu)	1kΩ		10kΩ		100kΩ		1000kΩ		5100kΩ	
	V (V/m ²)	P (Watt/m ²)	V (V/m ²)	P (Watt/m ²)	V (V/m ²)	P (Watt/m ²)	V (V/m ²)	P (Watt/m ²)	V (V/m ²)	P (Watt/m ²)
0	64,3	4,427	63,5	1,295	58,3	0,146	31,3	0,006	9,3	<<
1	160,3	14,198	159,0	6,074	145,8	0,904	78,5	0,047	23,3	0,002
2	177,8	18,664	176,3	5,675	161,5	1,114	86,8	0,061	25,5	0,003
3	192,5	13,687	191,0	5,959	175,0	1,313	94,3	0,066	27,3	0,003
4	177,3	13,187	175,8	5,202	161,3	1,113	86,5	0,061	27,3	0,003
5	176,8	13,893	175,5	5,879	161,0	1,111	86,5	0,061	25,0	0,005
6	129,5	5,219	123,8	2,426	90,8	0,327	48,5	0,019	14,0	0,001
7	87,8	2,159	87,0	1,975	79,8	0,263	43,0	0,017	13,0	0,001
8	47,4	1,785	46,9	0,633	42,8	0,077	22,4	0,004	5,6	<<
9	24,4	0,938	24,2	0,216	22,2	0,022	11,9	0,001	3,6	<<

Tabel IV.2 Hasil pengukuran dan perhitungan V dan P pada elektroda kawat *Ti-Wire* dengan variabel eksternal resistansi untuk penambahan *molasses* 2,5% dan MMY

Eksternal Resistansi Waktu (Minggu)	1kΩ		10kΩ		100kΩ		1000kΩ		5100kΩ	
	V (V/m ²)	P (Watt/m ²)	V (V/m ²)	P (Watt/m ²)	V (V/m ²)	P (Watt/m ²)	V (V/m ²)	P (Watt/m ²)	V (V/m ²)	P (Watt/m ²)
0	72,250	6,437	71,500	1,673	65,750	0,184	35,250	0,011	10,500	0,001
1	161,500	14,551	160,250	4,567	147,000	0,926	79,000	0,055	23,250	0,002
2	188,000	38,916	186,250	9,350	170,750	1,229	91,500	0,064	27,000	0,003
3	195,750	36,214	194,250	9,751	178,000	1,353	95,750	0,077	28,000	0,006
4	210,250	25,861	208,500	10,446	191,250	1,568	103,000	0,082	30,250	0,003
5	194,250	23,854	192,750	8,828	176,500	1,324	94,750	0,066	28,250	0,003
6	116,500	12,186	115,250	4,114	105,750	0,476	56,750	0,023	16,750	0,002
7	109,000	3,521	108,000	2,797	99,000	0,386	53,500	0,021	15,750	0,002
8	56,500	5,678	56,000	1,154	51,250	0,113	27,500	0,008	8,500	0,001
9	20,075	0,179	19,200	0,079	17,850	0,009	9,825	0,001	2,800	<<

Tabel IV.3 Hasil pengukuran dan perhitungan V dan P pada elektroda kawat *Ti-Wire* dengan variabel eksternal resistansi untuk penambahan *molasses* 5% dan MMY

Eksternal Resistansi Waktu (Minggu)	1k Ω		10k Ω		100k Ω		1000k Ω		5100k Ω	
	V (V/m ²)	P (Watt/m ²)	V (V/m ²)	P (Watt/m ²)	V (V/m ²)	P (Watt/m ²)	V (V/m ²)	P (Watt/m ²)	V (V/m ²)	P (Watt/m ²)
0	36,3	0,603	36,0	0,288	33,0	0,046	17,7	0,002	5,2	<<
1	101,0	5,636	99,5	2,050	91,3	0,356	49,0	0,020	14,3	0,001
2	157,5	14,490	156,3	4,703	143,5	0,875	77,8	0,047	24,3	0,002
3	166,0	15,720	163,8	5,420	150,3	0,947	80,5	0,056	23,8	0,005
4	170,0	16,779	168,5	5,594	154,8	0,990	83,3	0,050	24,3	0,002
5	157,8	17,668	155,8	6,479	150,3	0,886	77,3	0,046	23,0	0,002
6	170,0	12,852	168,5	5,780	154,5	0,989	83,3	0,050	24,3	0,002
7	185,0	14,245	183,3	6,139	168,0	1,277	90,3	0,063	26,8	0,003
8	176,8	15,413	175,3	5,801	160,8	1,077	86,3	0,060	25,5	0,005
9	149,8	8,955	148,5	3,965	136,3	0,790	73,5	0,044	22,0	0,002

Tabel IV.4 Hasil pengukuran dan perhitungan V dan P pada elektroda kawat *Ti-Wire* dengan variabel eksternal resistansi untuk penambahan *molasses* 10% dan MMY

Eksternal Resistansi Waktu (Minggu)	1k Ω		10k Ω		100k Ω		1000k Ω		5100k Ω	
	V (V/m ²)	P (Watt/m ²)	V (V/m ²)	P (Watt/m ²)	V (V/m ²)	P (Watt/m ²)	V (V/m ²)	P (Watt/m ²)	V (V/m ²)	P (Watt/m ²)
0	27,7	0,360	27,4	0,170	25,1	0,018	13,5	0,001	4,1	<<
1	51,5	1,530	51,0	0,643	46,8	0,094	25,0	0,005	7,3	<<
2	148,5	11,331	146,8	5,444	134,5	0,767	72,3	0,043	20,8	0,002
3	155,3	15,525	154,0	6,129	141,0	0,846	75,8	0,045	23,0	0,005
4	162,5	17,111	161,3	7,418	147,8	0,916	79,5	0,056	23,8	0,005
5	173,5	17,524	172,0	7,465	157,8	1,025	84,8	0,059	25,0	0,003
6	172,8	15,237	171,3	7,552	157,0	1,052	84,5	0,059	24,5	0,005
7	173,3	20,270	171,8	7,454	157,5	1,055	84,5	0,059	24,3	0,002
8	168,3	13,006	166,8	6,270	153,0	0,995	82,3	0,049	24,5	0,002
9	116,3	6,963	115,3	3,285	105,8	0,476	57,0	0,023	16,8	0,002

Tabel IV.5 Hasil pengukuran dan perhitungan V dan P pada elektroda kawat *Ti-Wire* dengan variabel eksternal resistansi untuk penambahan *molasses* 15% dan MMY

<div> <div>Eksternal Resistansi</div> <div>Waktu (Minggu)</div> </div>	1k Ω		10k Ω		100k Ω		1000k Ω		5100k Ω	
	V (V/m ²)	P (Watt/m ²)	V (V/m ²)	P (Watt/m ²)	V (V/m ²)	P (Watt/m ²)	V (V/m ²)	P (Watt/m ²)	V (V/m ²)	P (Watt/m ²)
0	20,2	0,190	19,9	0,084	18,2	0,011	9,8	0,001	2,9	<<
1	35,3	0,710	34,9	0,293	31,9	0,041	17,1	0,002	5,0	<<
2	51,3	1,584	50,5	0,616	46,3	0,093	24,8	0,005	7,8	0,001
3	113,8	5,335	111,5	1,918	102,3	0,286	51,8	0,016	14,8	0,001
4	159,0	10,383	157,5	5,402	144,5	0,881	77,8	0,047	25,5	0,003
5	148,3	13,046	147,0	5,130	134,8	0,768	72,3	0,043	21,3	0,002
6	165,5	10,724	164,3	6,225	150,8	0,950	81,0	0,049	24,3	0,002
7	170,5	8,201	169,0	5,273	155,0	0,992	83,5	0,058	25,0	0,005
8	169,3	10,307	167,8	6,022	154,0	1,001	82,8	0,058	24,3	0,002
9	167,5	11,223	166,0	6,258	152,3	0,959	81,8	0,057	24,3	0,005

IV.1.3 Hasil Pengukuran Jumlah Bakteri dan Power Density

Hasil pengukuran jumlah bakteri dan power density ditunjukkan pada Tabel IV.6.

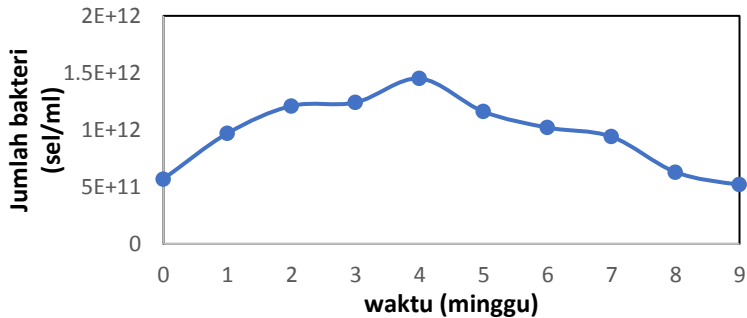
Tabel IV.6 Hasil pengukuran dan perhitungan jumlah bakteri dan tegangan listrik pada elektroda kawat tembaga untuk variabel *molasses* 2,5% penambahan MMY dan tanpa MMY dengan variabel eksternal resistansi 1k Ω

Waktu (minggu)	MMY		Tanpa MMY	
	P (Watt/m ²)	Jumlah Bakteri (sel/ml)	P (Watt/m ²)	Jumlah Bakteri (sel/ml)
0	5,0337	5,4 x 10 ¹¹	5,678	5,5 x 10 ¹¹
1	5,8763	7,9 x 10 ¹¹	14,79	7,3 x 10 ¹¹
2	14,222	1,03 x 10 ¹¹	14,85	9,4 x 10 ¹¹
3	13,857	1,21 x 10 ¹²	12,078	1 x 10 ¹²
4	16,4112	1,29 x 10 ¹²	2,601	1,27 x 10 ¹²
5	12,7519	1,18 x 10 ¹²	0,403	9,4 x 10 ¹¹
6	10,5109	1,14 x 10 ¹²	0,098	4,5 x 10 ¹¹

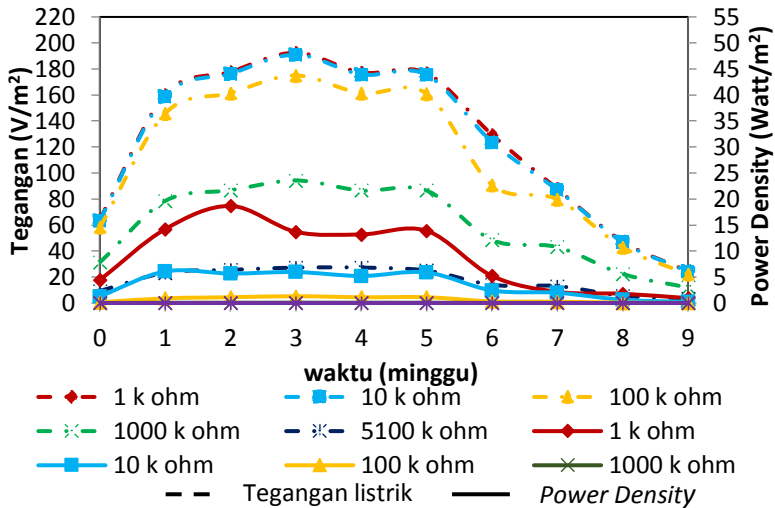
IV.2 Pembahasan

IV.2.1 Pengaruh Eksternal Resistansi

Pada penelitian ini dilakukan dengan pemakaian lima variabel eksternal resistansi yakni 1 k Ω , 10 k Ω , 100 k Ω , 1000 k Ω , dan 5100 k Ω . Penggunaan kelima eksternal resistansi tersebut untuk mengetahui eksternal resistansi mana yang paling optimum dalam menghasilkan tegangan listrik. Hasil pengukuran antara tegangan listrik dan power density dengan penambahan berbagai presentase *molasses* dapat dilihat pada Gambar IV.4, IV.6, IV.8, IV.10, dan IV.12. Selain itu, pada penelitian ini juga dilakukan perhitungan jumlah bakteri dengan berbagai presentase *molasses* seperti yang ditunjukkan pada Gambar IV.3, IV.5, IV.7, IV.9, dan IV.11.



Gambar IV.3 Perbandingan antara jumlah bakteri dengan waktu untuk penambahan *molasses* 1,25%

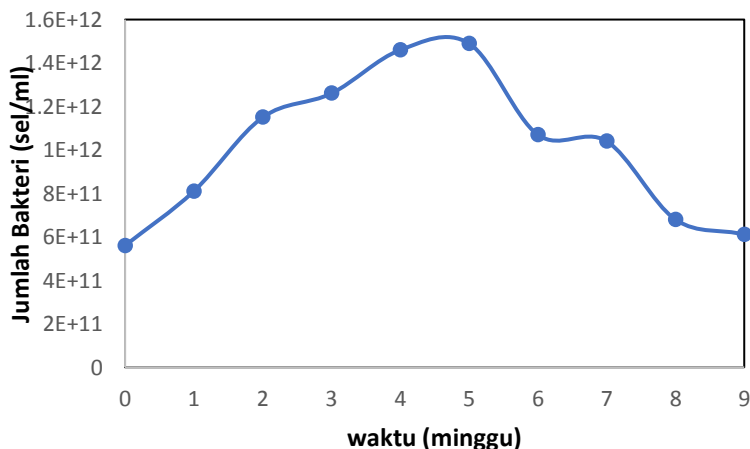


Gambar IV.4 Perbandingan antara tegangan listrik dan power density dengan waktu menggunakan variabel eksternal resistansi untuk penambahan *molasses* 1,25%

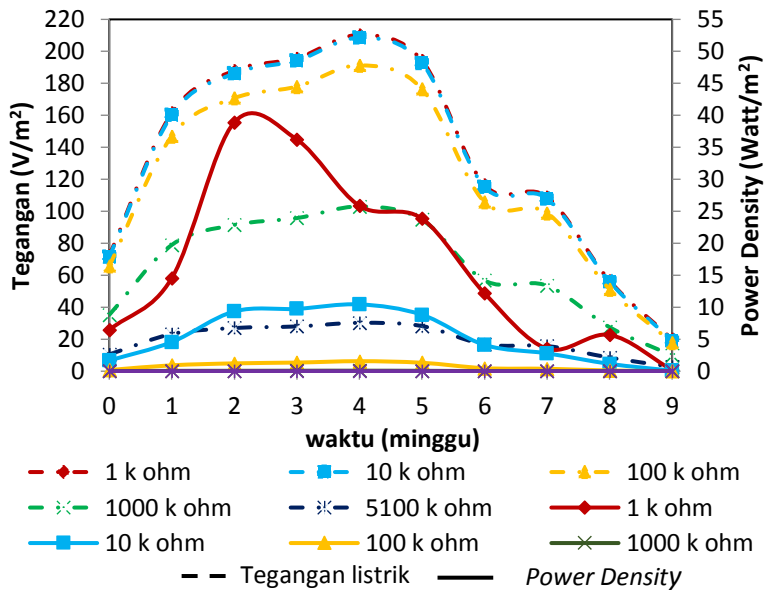
Pada Gambar IV.4 menunjukkan perbandingan tegangan listrik dan power density setiap minggu dengan penambahan *molasses* 1,25% menggunakan berbagai eksternal resistansi. Gambar diatas menunjukkan kondisi yang fluktuatif pada tegangan

listrik dan power density yang dihasilkan. Tegangan listrik tertinggi dicapai oleh variabel eksternal resistansi $1\text{ k}\Omega$ yakni sebesar $192,5\text{ V/m}^2$ pada minggu ke-3, dimana kenaikan tegangan listrik terjadi hingga minggu ke-3 kemudian mengalami penurunan pada minggu ke-4. Selanjutnya nilai tegangan listrik cenderung konstan dari minggu ke-4 hingga minggu ke-5 dan menunjukkan penurunan kembali secara perlahan.

Berbeda dengan power density, perolehan tertinggi dicapai oleh variabel eksternal resistansi $1\text{ k}\Omega$ yakni sebesar $13,687\text{ Watt/m}^2$ pada minggu ke-2, dimana kenaikan tegangan listrik terjadi hingga minggu ke-2 kemudian mengalami penurunan pada minggu ke-3. Selanjutnya nilai tegangan listrik cenderung konstan dari minggu ke-3 hingga minggu ke-5 dan menunjukkan penurunan kembali secara perlahan. Hal ini dikarenakan aktifitas dan populasi mikroorganisme yang mengalami kenaikan dan penurunan yang dapat dibuktikan dari hasil perhitungan jumlah bakteri pada Gambar IV.3.



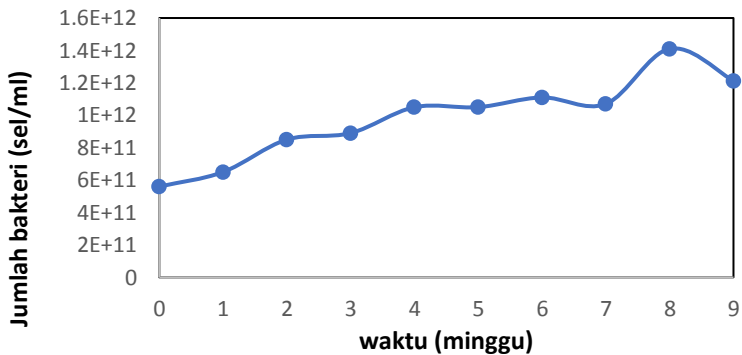
Gambar IV.5. Perbandingan antara jumlah bakteri dengan waktu untuk penambahan *molasses* 2,5%



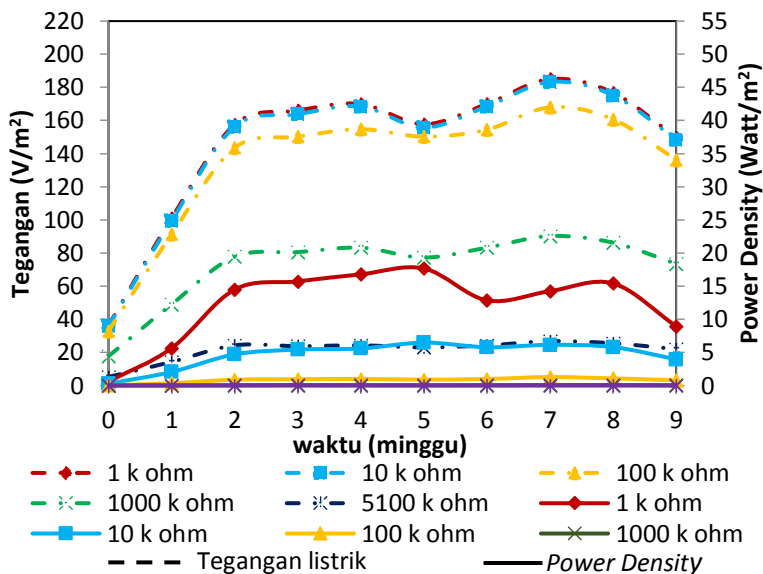
Gambar IV.6. Perbandingan antara tegangan listrik dan power density dengan waktu menggunakan variable eksternal resistansi untuk penambahan *molasses* 2,5%

Pada Gambar IV.6 menunjukkan perbandingan tegangan listrik dan power density setiap minggu dengan penambahan *molasses* 2,5% menggunakan berbagai eksternal resistansi. Gambar diatas menunjukkan kondisi yang fluktuatif pada tegangan listrik dan power density yang dihasilkan. Tegangan listrik tertinggi dicapai oleh variabel eksternal resistansi 1 k Ω yakni sebesar 210,25 V/m² pada minggu ke-4, dimana kenaikan tegangan listrik terjadi hingga minggu ke-4 kemudian mengalami penurunan pada minggu ke-5. Selanjutnya nilai tegangan listrik cenderung konstan dari minggu ke-6 hingga minggu ke-7 dan menunjukkan penurunan kembali secara perlahan.

Berbeda dengan power density, perolehan tertinggi dicapai oleh variabel eksternal resistansi $1\text{ k}\Omega$ yakni sebesar $38,916\text{ Watt/m}^2$ pada minggu ke-2, dimana kenaikan tegangan listrik terjadi hingga minggu ke-2 kemudian mengalami penurunan pada minggu ke-3. Selanjutnya nilai tegangan listrik cenderung konstan dari minggu ke-3 hingga minggu ke-5 dan menunjukkan penurunan kembali secara perlahan. Hal ini dikarenakan aktifitas dan populasi mikroorganisme yang mengalami kenaikan dan penurunan yang dapat dibuktikan dari hasil perhitungan jumlah bakteri pada Gambar IV.5.



Gambar IV.7. Perbandingan antara jumlah bakteri dengan waktu untuk penambahan *molasses* 5%

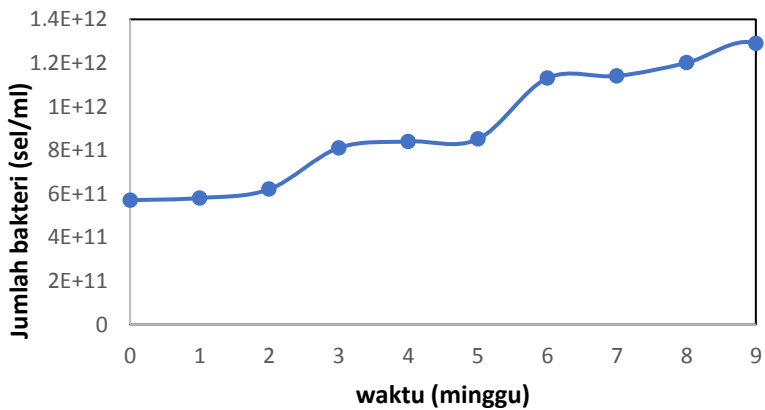


Gambar IV.8. Perbandingan antara tegangan listrik dan power density dengan waktu menggunakan variabel eksternal resistansi untuk penambahan *molasses* 5%

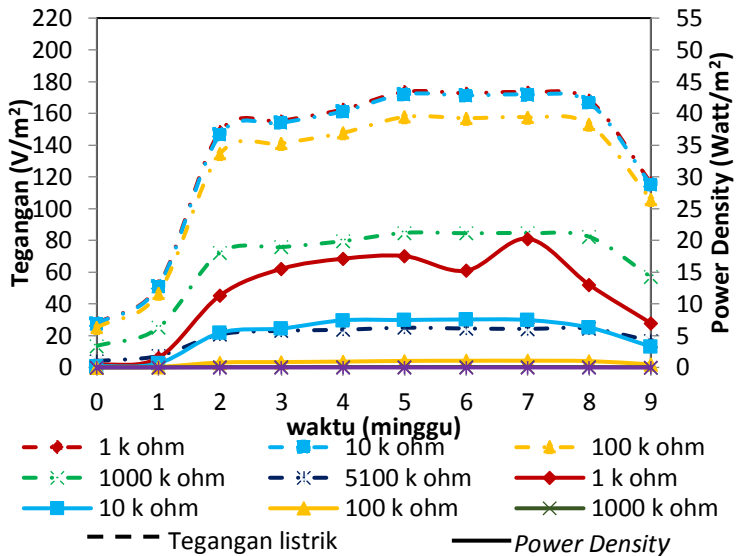
Pada Gambar IV.8 menunjukkan perbandingan tegangan listrik dan power density setiap minggu dengan penambahan *molasses* 5% menggunakan berbagai eksternal resistansi. Tegangan listrik tertinggi dicapai oleh variabel eksternal resistansi 1 k Ω yakni sebesar 185 V/m² pada minggu ke-7, dimana kenaikan tegangan listrik terjadi hingga minggu ke-2 kemudian cenderung konstan dari minggu ke-2 hingga minggu ke-4. Pada minggu ke-5 nilai tegangan listrik mengalami penurunan dan menunjukkan kenaikan kembali hingga minggu ke-7 dan akhirnya secara perlahan mengalami penurunan.

Berbeda dengan power density, perolehan tertinggi dicapai oleh variabel eksternal resistansi 1 k Ω yakni sebesar 17,668 Watt/m² pada minggu ke-5, dimana kenaikan tegangan

listrik terjadi hingga minggu ke-5 dengan cepat kemudian naik secara perlahan. Pada minggu ke-6 nilai menunjukkan penurunan. Selanjutnya kembali naik pada minggu ke-7 dan akhirnya turun. Hal ini dikarenakan aktifitas dan populasi mikroorganisme yang mengalami kenaikan dan penurunan yang dapat dibuktikan dari hasil perhitungan jumlah bakteri pada Gambar IV.7.



Gambar IV.9. Perbandingan antara jumlah bakteri dengan waktu menggunakan variabel eksternal resistansi untuk penambahan *molasses* 10%

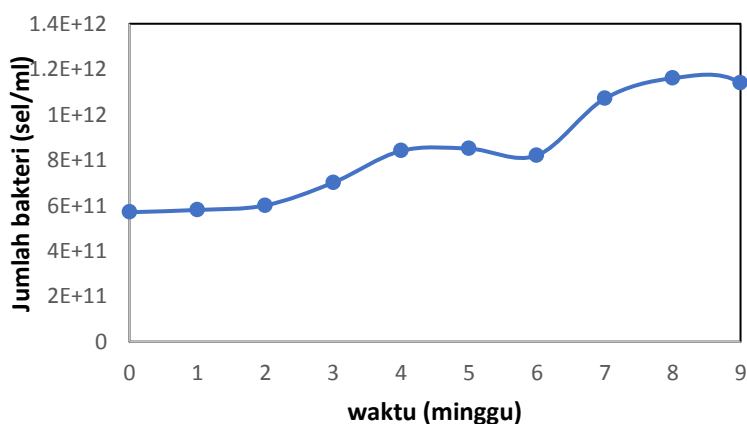


Gambar IV.10. Perbandingan antara tegangan listrik dan power density dengan waktu menggunakan variabel eksternal resistansi untuk penambahan *molasses* 10%

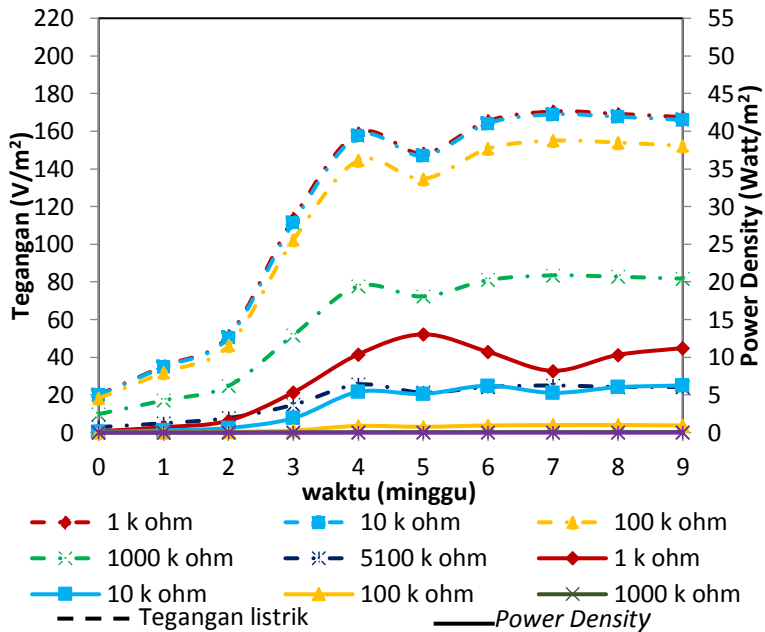
Pada Gambar IV.10 menunjukkan perbandingan tegangan listrik dan power density setiap minggu dengan penambahan *molasses* 10% menggunakan berbagai eksternal resistansi. Tegangan listrik tertinggi dicapai oleh variabel eksternal resistansi 1 kΩ yakni sebesar 173,5 V/m² pada minggu ke-5, dimana kenaikan tegangan listrik secara drastis terjadi hingga minggu ke-2 kemudian naik secara perlahan hingga minggu ke-5. Nilai tegangan cenderung konstan dari minggu ke-5 hingga minggu ke-8. Kemudian akhirnya secara perlahan mengalami penurunan.

Berbeda dengan power density, perolehan tertinggi dicapai oleh variabel eksternal resistansi 1 kΩ yakni sebesar 20,27 Watt/m² pada minggu ke-7, dimana kenaikan tegangan listrik terjadi secara perlahan hingga minggu ke-5 kemudian turun pada minggu ke-6. Pada minggu ke-7 nilai kembali naik dan akhirnya

turun secara perlahan. Hal ini dikarenakan aktifitas dan populasi mikroorganisme yang mengalami kenaikan sampai minggu terakhir yang dapat dibuktikan dari hasil perhitungan jumlah bakteri pada Gambar IV.9. Namun pada minggu ke-9 terjadi penurunan power density di saat bakteri masih terus bertumbuh, kondisi ini disebabkan karena adanya bakteri-bakteri yang telah mati pada biofilm yang terbentuk pada permukaan elektroda sehingga menghambat transfer elektron.



Gambar IV.11. Perbandingan antara jumlah bakteri dengan waktu untuk penambahan *molasses* 15%



Gambar IV.12. Perbandingan antara tegangan listrik dan power density dengan waktu menggunakan variable eksternal resistansi untuk penambahan *molasses* 15%

Pada gambar IV.12 menunjukkan perbandingan tegangan listrik dan power density setiap minggu dengan penambahan *molasses* 15% menggunakan berbagai eksternal resistansi. Tegangan listrik tertinggi dicapai oleh variabel eksternal resistansi 1 kΩ yakni sebesar 170,5 V/m² pada minggu ke-7, dimana kenaikan tegangan listrik terjadi hingga minggu ke-4 dan pada minggu ke-5 mengalami penurunan. Kemudian pada minggu ke-6 nilai tegangan listrik mengalami kenaikan dan cenderung konstan dari minggu ke-7 hingga minggu akhir.

Berbeda dengan power density, perolehan tertinggi dicapai oleh variabel eksternal resistansi 1 kΩ yakni sebesar 13,05

Watt/m² pada minggu ke-5, dimana kenaikan tegangan listrik terjadi hingga minggu ke-5 dengan perlahan kemudian turun pada minggu ke-6. Kenaikan nilai terjadi kembali pada minggu ke-8. Hal ini dikarenakan aktifitas dan populasi mikroorganisme yang mengalami kenaikan hingga minggu terakhir yang dapat dibuktikan dari hasil perhitungan jumlah bakteri pada Gambar IV.11.

Eksternal resistansi secara langsung mempengaruhi potensial dan arus listrik, dan juga mempengaruhi variabel lain di dalam *MFCs*, seperti keragaman bakteri, morfologi biofilm, power yang dihasilkan, *coulombic efficiency*, dan stabilitasnya. Oleh karena itu pemilihan eksternal resistansi yang optimal untuk mendapatkan performa yang baik dalam sistem *MFCs* sangat penting. Pemilihan eksternal resistansi dapat menyeleksi pertumbuhan populasi mikroba di dalam chamber anoda pada sistem *MFCs*. Sebagai konsekuensi dari tingginya eksternal resistansi, keragaman mikroorganisme berubah dan powernya akan rendah. Hal ini dapat berhubungan dengan internal resistansi yang merupakan hambatan yang muncul karena dipengaruhi massa jenis, panjang kawat, dan luas penampang kawat. Sehingga didapatkan pada hukum ohm yaitu

$$I = \frac{V}{R_{ext} + R_{int}}$$

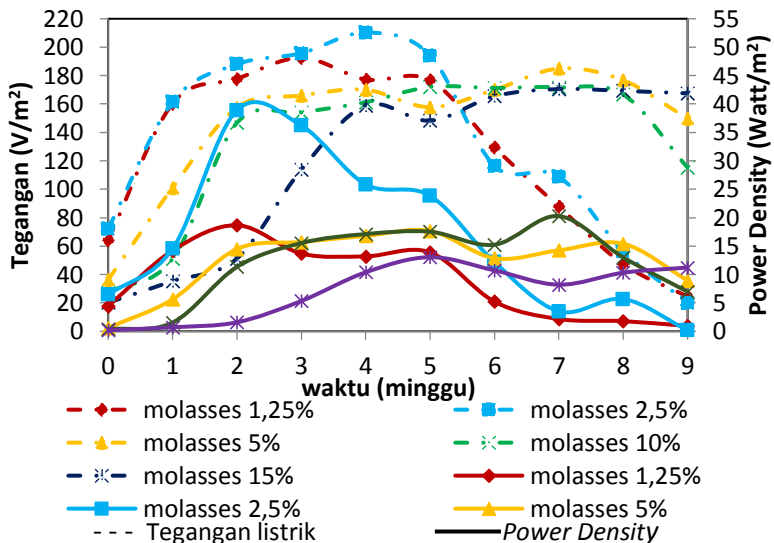
$$P = I^2 \times R_{ext} = \frac{V^2}{(R_{ext} + R_{int})^2} \times R_{ext} = \frac{V^2}{R_{int}^2 / R_{ext} + 2R_{int} + R_{ext}} \cdot R_{ext}$$

Pada teorema transfer daya maksimum menyatakan bahwa power maksimum didapatkan saat eksternal resistansi sama dengan internal resistansi, yaitu saat $(R_{int})^2 = (R_{ext})^2$. Jika Eksternal resistansi lebih besar atau lebih kecil dari internal resistansi maka power akan turun (Campo dkk, 2014). Hal tersebut sesuai dengan hasil yang diperoleh pada penelitian ini yaitu pada Gambar IV.4, IV.6, IV.8, IV.10, dan IV.12, dimana eksternal resistansi yang paling optimum adalah 1 kΩ diantara 10 kΩ, 100 kΩ, 1000 kΩ, dan 5100 kΩ. Dengan perolehan tegangan listrik dan power density terbesar yakni 210,25 V/m² dan 38,916 Watt/m² pada Gambar

IV.6. Pada penelitian oleh Katuri dkk, (2011) juga diperoleh power density tertinggi pada variabel eksternal resistansi 1 k Ω .

IV.2.2 Pengaruh Penambahan *Molasses*

Untuk mengetahui pengaruh penambahan *molasses* terhadap listrik yang dihasilkan, pada penelitian ini dilakukan dengan pemakaian lima variabel penambahan *molasses* yakni 1,25%; 2,5%; 5%; 10%; dan 15%.



Gambar IV.13. Perbandingan antara tegangan listrik dan power density dengan waktu untuk variabel penambahan *molasses* menggunakan eksternal resistansi 1k Ω

Dalam Gambar IV.13 menunjukkan medium paling optimum yaitu lumpur Lapindo dengan penambahan *molasses* 2,5% dimana potensial listrik yang dihasilkan pada minggu ke-4 adalah 210,25 V/m² dengan menggunakan eksternal resistansi 1 k Ω . Pada gambar tersebut terjadi kenaikan tegangan listrik hingga minggu ke-4 kemudian mengalami penurunan pada minggu ke-5.

Selanjutnya nilai tegangan listrik cenderung konstan dari minggu ke-6 hingga minggu ke-7 dan menunjukkan penurunan kembali secara perlahan. Berbeda dengan power density, perolehan sebesar 36,214 Watt/m² pada minggu ke-2, dimana kenaikan tegangan listrik terjadi hingga minggu ke-2 kemudian mengalami penurunan pada minggu ke-3. Selanjutnya nilai tegangan listrik cenderung konstan dari minggu ke-3 hingga minggu ke-5 dan menunjukkan penurunan kembali secara perlahan.

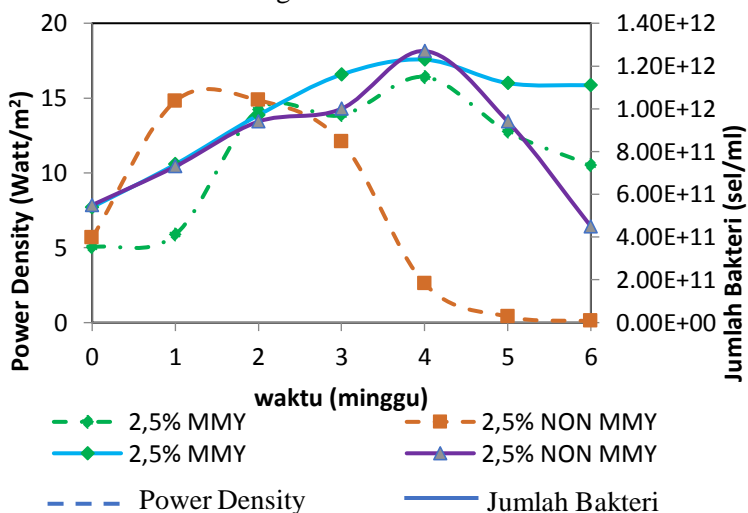
Molasses sebagai hasil sampingan dari proses produksi gula tebu, telah banyak digunakan untuk menghasilkan energi terbarukan seperti etanol dan biogas. Sukrosa yang terkandung dalam *molasses* digunakan sebagai sumber C utama untuk MFC. Molekul substrat menyebar melalui biofilm, yang diendapkan pada permukaan anoda, dan dioksidasi oleh bakteri yang berada di dalam film. Tingkat COD *molasses* yang lebih tinggi menghasilkan tegangan yang lebih tinggi, karena lebih banyak molekul sukrosa yang teroksidasi. Studi yang dilakukan Sirinutsomboon (2014), menyatakan bahwa terdapat efek perbedaan ketebalan biofilm pada tegangan dengan tingkat COD yang lebih tinggi. Jika biofilm terlalu tipis, bakteri dalam jumlah kecil tidak dapat mengikuti jumlah sukrosa yang tinggi. Listrik yang dihasilkan tidak meningkat seiring dengan bertambahnya jumlah sukrosa.

Pada penelitian ini, potensial listrik yang terbaik dicapai pada saat menggunakan lumpur Lapindo dengan penambahan *molasses* 2,5% w/w. Hal ini terjadi, dimungkinkan karena kombinasi lumpur lapindo (97,5% w/w) yang mengandung sejumlah bakteri electricigen dengan sumber karbon yang berasal dari *molasses* adalah media yang optimum.

IV.2.3 Pengaruh Penambahan Nutrien MMY

Untuk mengetahui potensi listrik yang dihasilkan dengan penambahan nutrisi dilakukan di penelitian ini juga menggunakan variabel kontrol dimana untuk kontrolnya tidak diberikan penambahan nutrisi untuk setiap minggunya. Nutrien yang

digunakan pada penelitian ini yaitu MMY atau Minimum Medium Yeast. Peran utama nutrisi sendiri adalah sebagai sumber energi, bahan pembangun sel dan asektor elektron dalam reaksi bioenergetik atau reaksi yang menghasilkan energi (Waluyo, 2005). Dari metabolisme mikroorganisme tersebut akan didapatkan kemampuan dari nutrisi itu sendiri guna mendukung mikroorganisme dalam memproduksi listrik. MMY memiliki kandungan NH_4NO_3 , KH_2PO_4 , $\text{K}_2\text{HPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, CaCl_2 , $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$, dan ekstrak yeast. MMY telah memenuhi kebutuhan karbon, nitrogen, pospor, sulfur, dan rich medium sebagai sumber energi dan pertumbuhan sel pada mikroorganisme. Disini MMY berguna sebagai bahan organik tambahan untuk dikonsumsi oleh mikroorganisme.



Gambar IV.14. Perbandingan antara power density dan jumlah bakteri dengan waktu untuk variabel penambahan *molasses* 2,5% menggunakan eksternal resistansi 1 k Ω dengan MMY dan tanpa MMY

Dalam Gambar IV.14 menunjukkan perbandingan antara power density dan jumlah bakteri dengan waktu untuk variabel penambahan *molasses* 2,5% menggunakan eksternal resistansi 1

k Ω dengan penambahan MMY setiap minggunya. Dari gambar diatas dapat dilihat nilai power density awal dimulai dari 5,03 watt/m² dan berakhir pada minggu ke 6 yaitu 10,51 watt/m². Power density tertinggi dicapai oleh variabel eksternal resistansi 1 k Ω yakni sebesar 16,41 watt/m² pada minggu ke-4, dimana kenaikan tegangan listrik terjadi hingga minggu ke-2 kemudian mengalami penurunan pada minggu ke-3. Selanjutnya nilai tegangan listrik cenderung naik pada minggu ke-4 kemudian minggu ke-5 sampai ke-6 menunjukkan penurunan kembali secara perlahan. Begitu juga dengan perolehan jumlah bakteri yang dihasilkan terbesar pada minggu ke-4 yaitu $1,29 \times 10^{12}$ sel/ml.

Elektroda *carbon cloth* dengan variabel 2,5% tanpa penambahan nutrien MMY digunakan untuk mengetahui pola hasil pengukuran tegangan listrik hingga 6 minggu ditunjukkan pada gambar IV.14. Dalam pengukuran power density ini diberikan eksternal resistansi sebesar 1 k Ω . Dari gambar IV.14 diatas dapat dilihat nilai power density awal dimulai dari 5,68 watt/m² dan berakhir pada minggu ke 6 yaitu 0,1 watt/m². Power density tertinggi dicapai oleh variabel eksternal resistansi 1 k Ω yakni sebesar 14,85 watt/m² pada minggu ke-2. Begitu juga dengan perolehan jumlah bakteri yang dihasilkan terbesar pada minggu ke-4 yaitu $1,27 \times 10^{12}$ sel/ml.

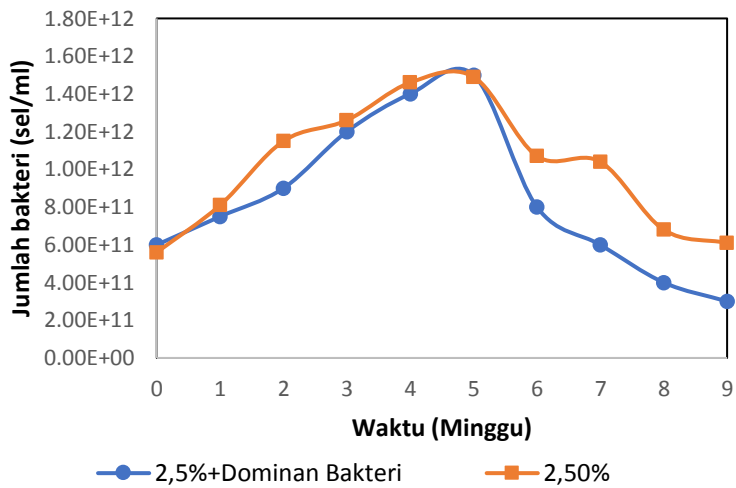
Dari kedua gambar diatas dapat disimpulkan bahwa variabel yang menggunakan MMY dapat menghasilkan power density dan jumlah bakteri yang lebih besar dibandingkan tanpa menggunakan MMY. Penurunan tegangan listrik yang terjadi disebabkan karena ketersediaan nutrien di dalam MMY yang berkurang sehingga tidak dapat menghasilkan listrik yang maksimum. Dengan kata lain, kandungan organik yang terdapat pada nutrien tidak sebanding dengan jumlah bakteri. Persaingan antar bakteri dalam merebutkan makanan menyebabkan metabolisme bakteri tidak berjalan lancar. Karena tidak semua bakteri dapat melakukan metabolisme dengan maksimal, sehingga menyebabkan penurunan produksi listrik yang dihasilkan. Hal ini membuktikan bahwa penambahan nutrien memiliki pengaruh

terhadap kebutuhan bahan organik yang dikonsumsi oleh mikroorganisme terhadap kestabilan tegangan yang dihasilkan.

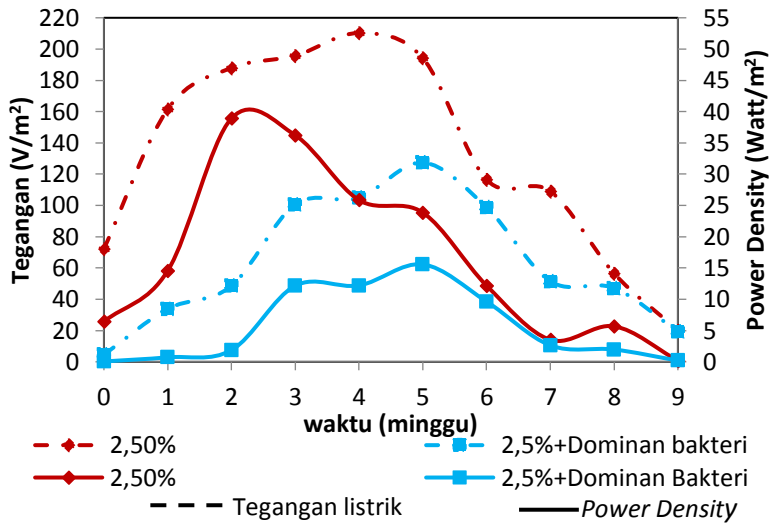
IV.2.4 Pengaruh Penambahan Dominan Bakteri

Menurut Davis dan Higson (2007), MFCs memanfaatkan mikroba yang dapat mengoksidasi sumber-sumber material yang bernilai ekonomis seperti sampah organik, bahan-bahan organik yang terdapat didalam tanah dan di endapan (Lumpur). Lumpur lapindo memiliki kandungan organik sebesar 54,75-55,47% (Juaniawan, 2013) sehingga dimungkinkan terdapat mikroorganisme electricigens yang mampu membantu untuk menghasilkan biolistrik pada sistem MFCs. Mikroorganisme ini dapat mengoksidasi komponen organik dan mampu membantu menghasilkan energi listrik dari terjadinya transfer elektron (Reddy dkk, 2010). Mikroorganisme yang berperan penting dalam sistem MFCs merupakan bakteri penghasil listrik yang umum digunakan seperti *Geobacter sp*, *Shewanella sp*, dan *Eschericia coli* (Januarita dkk, 2016).

Pada penelitian ini dilakukan penambahan dominan bakteri *Shewanella sp* MR-1 dan *Eschericia coli* (dengan rasio perbandingan 1:1) ke dalam reaktor ketika fase log terjadi. Penambahan dominan bakteri tersebut untuk mengetahui bagaimana pengaruh terhadap potensial listrik yang dihasilkan dibandingkan dengan hanya memanfaatkan bakteri yang berasal dari lumpur.



Gambar IV.15. Perbandingan antara jumlah bakteri dengan waktu untuk penambahan *molasses* 2,5% menggunakan eksternal resistansi 1 k Ω



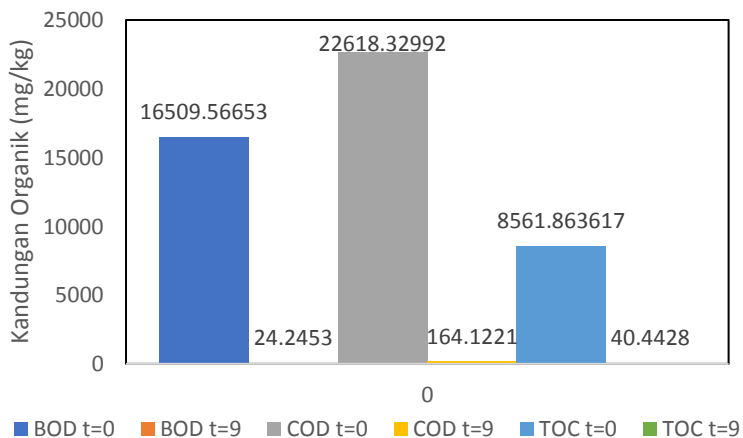
Gambar IV.16. Perbandingan antara tegangan listrik dan power density dengan waktu untuk penambahan *molasses* 2,5% menggunakan eksternal resistansi 1 k Ω

Pada Gambar IV.16 menunjukkan perbandingan antara tegangan listrik dan power density yang dihasilkan pada variabel *molasses* 2,5% dengan penambahan dominan bakteri dan tanpa penambahan. Untuk variabel *molasses* 2,5% tanpa penambahan dominan bakteri, tegangan listrik tertinggi yang dapat dicapai 201,25 V/m² pada minggu ke-4 dan nilai power density tertinggi mencapai 38,91 watt/m². Sedangkan untuk variabel *molasses* 2,5% dengan penambahan dominan bakteri dicapai tegangan listrik 127,43 V/m² dan untuk power density tertinggi sebesar 15,51 watt/m². Dari tabel tersebut ditunjukkan bahwa variabel *molasses* 2,5% dengan penambahan dominan bakteri dapat menghasilkan tegangan listrik dan power density yang lebih rendah dibandingkan dengan variabel 2,5% tanpa penambahan dominan bakteri. Hal ini dikarenakan aktifitas dan populasi mikroorganisme yang lebih banyak dengan jumlah substrat yang semakin hari semakin

berkurang karena volume reaktor tetap menyebabkan terjadinya perebutan makanan diantara sel bakteri yang dapat dibuktikan dari hasil perhitungan jumlah bakteri pada Gambar IV.15. Selain itu, dimungkinkan keberadaan bakteri yang terkandung di dalam lumpur Lapindo lebih berperan dalam menghasilkan biolistrik dibandingkan dominan bakteri yang ditambahkan.

IV.2.5 Degradasi BOD, COD dan TOC terhadap waktu pada proses MFCs

Pengamatan degradasi/penurunan BOD, COD, dan TOC juga dilakukan pada penelitian ini. Awal dan akhir ketiga parameter komponen organik tersebut ditunjukkan pada gambar berikut :



Gambar IV.17 Hasil Uji BOD₅, COD, dan TOC variabel *molasses* 5% dengan Ti-Wire pada t_0 hingga t_9

Pada Gambar IV.17 menunjukkan hasil uji pada parameter BOD₅ (*Biological Oxygen Demand*), COD (*Chemical Oxygen Demand*), dan TOC (*Total Organic Carbon*) yang telah dilakukan di Balai Riset dan Standarisasi Industri Surabaya (Baristand Surabaya). Dari Gambar IV.17 dapat dilihat perbandingan hasil uji

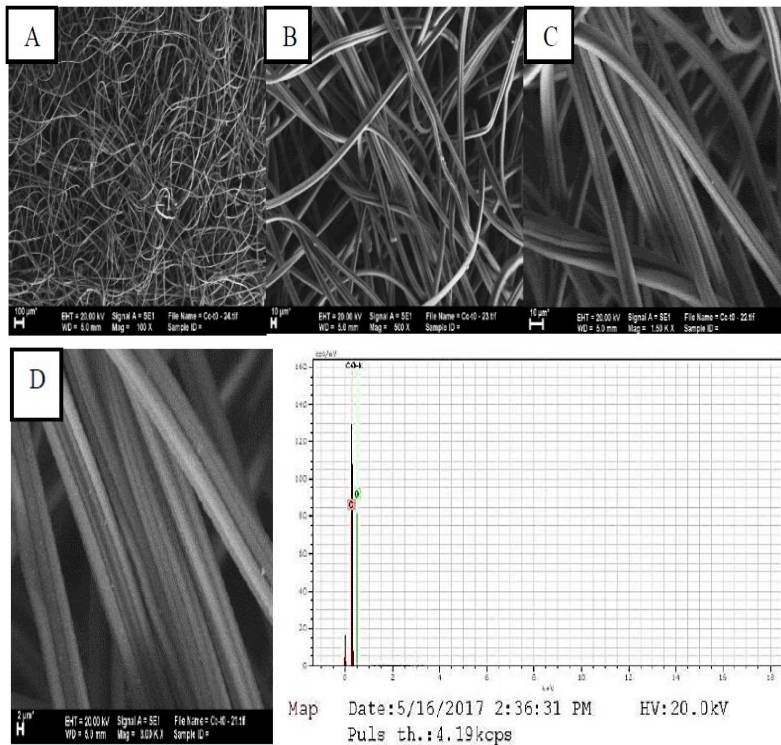
percobaan pada sampel *molasses* 5% dengan menggunakan Ti-Wire pada awal percobaan (t_0) dan pada akhir percobaan di minggu ke-9 (t_9). Hasil sampel menunjukkan perbedaan penurunan kandungan BOD₅ dari minggu ke-0 sampai minggu ke 9 dengan persen penurunan kandungan BOD₅ setelah 9 minggu adalah 99,85%. Hal ini menunjukkan adanya aktifitas bakteri dalam mengurai unsur organik yang terdapat di dalam substrat. Dari hasil pengujian juga diketahui nilai COD setelah 9 minggu dimana mengalami penurunan sebesar 99,27%. Penurunan COD menunjukkan terjadinya proses bioremediasi pada substrat yang mendukung konsep pemanfaatan unsur organik oleh mikroba pada proses oksidasi (Nair dkk, 2013). Menurunnya hasil COD dimana sebanding dengan penurunan kandungan TOC setelah 9 minggu proses, dimana penurunan TOC pada sampel ini sebesar 99,53%. Hal ini menunjukkan bahwa bakteri memanfaatkan unsur organik di area anoda untuk proses oksidasi. Dari ketiga parameter pengujian baik BOD₅, COD, dan TOC pada variabel 5% *molasses* masing-masing mengalami penurunan terbesar terdapat pada BOD₅ yaitu 99,85%. Penurunan tersebut diikuti dengan penurunan potensi energi listrik yang dihasilkan pada percobaan ini. Sehingga diketahui bahwa semakin kecil nilai ketiga parameter uji diatas maka semakin menurun pula potensi energi listrik yang dapat dihasilkan. Hal ini diakibatkan karena unsur organik yang terdapat didalam substrat yang semakin sedikit karena telah dimanfaatkan oleh bakteri.

IV.2.6 Hasil Uji SEM-EDX

Scanning Electron Microscopy (SEM) adalah mikroskop elektron yang digunakan untuk mengamati morfologi permukaan dalam skala mikro dan nano. Pengujian EDX atau *Energy Dispersive X-ray* digunakan untuk mengidentifikasi komposisi unsur-unsur yang terkandung didalam sampel. Pengujian SEM-EDX pada elektroda, kami ujikan di Laboratorium Energi dan Lingkungan LPPM-ITS, terdiri dari :

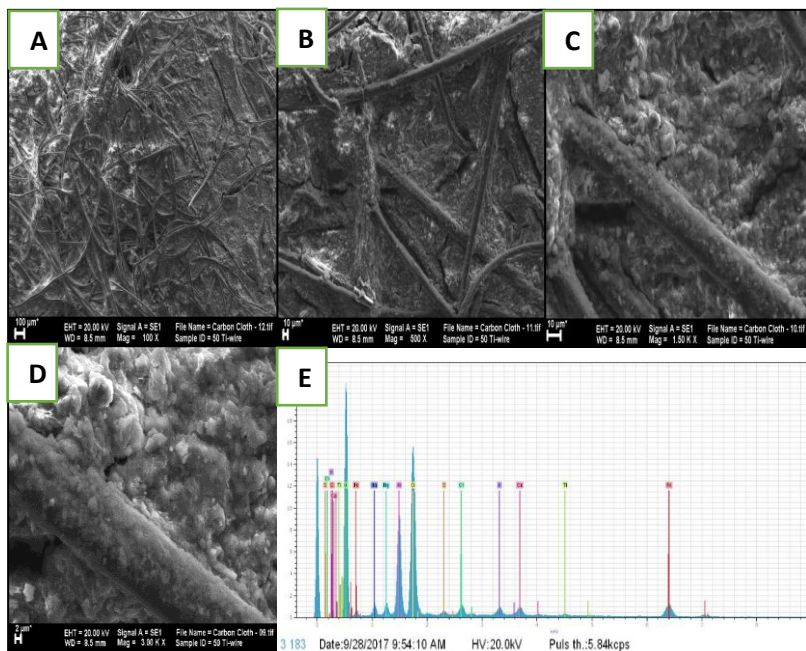
1. *Carbon Cloth* pada minggu ke-0

2. *Carbon Cloth* dengan variabel 5% berkawat *Ti-wire* dari laboratorium hingga minggu ke-9
3. *Carbon Cloth* dengan variabel 5% berkawat tembaga dari laboratorium hingga minggu ke-9
4. *Carbon Cloth* dengan variabel 5% Non-MMY dari laboratorium hingga minggu ke-9



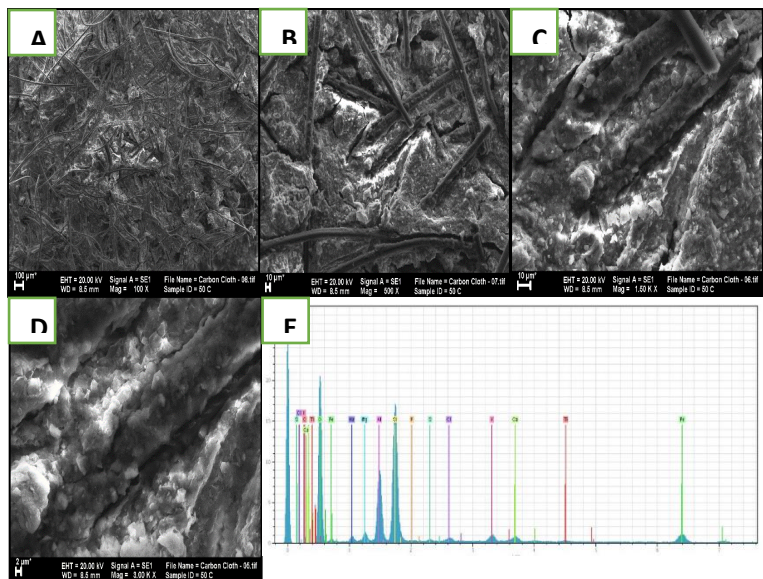
Gambar IV.18 Hasil Analisa SEM dan EDX elektroda *Carbon Cloth* murni, A, B, C, dan D menunjukkan hasil Analisa SEM pada perbesaran 100x, 500x, 1500x, dan 3000x, E menunjukkan hasil spektrum EDX pada perbesaran 3000x

Gambar IV.18 menunjukkan hasil Analisa SEM dan EDX pada elektroda *Carbon Cloth* murni. Gambar A, B, C, dan D menunjukkan hasil Analisa SEM dengan perbesaran 100x, 500x, 1500x, dan 3000x. E menunjukkan hasil Analisa EDX pada perbesaran 3000x dimana *Carbon Cloth* memiliki morfologi seperti sekumpulan serat yang tidak beraturan dan memiliki permukaan yang masih bersih. Kondisi awal elektroda *Carbon Cloth* ini selanjutnya akan dibandingkan dengan kondisi setelah 9 minggu percobaan di laboratorium.



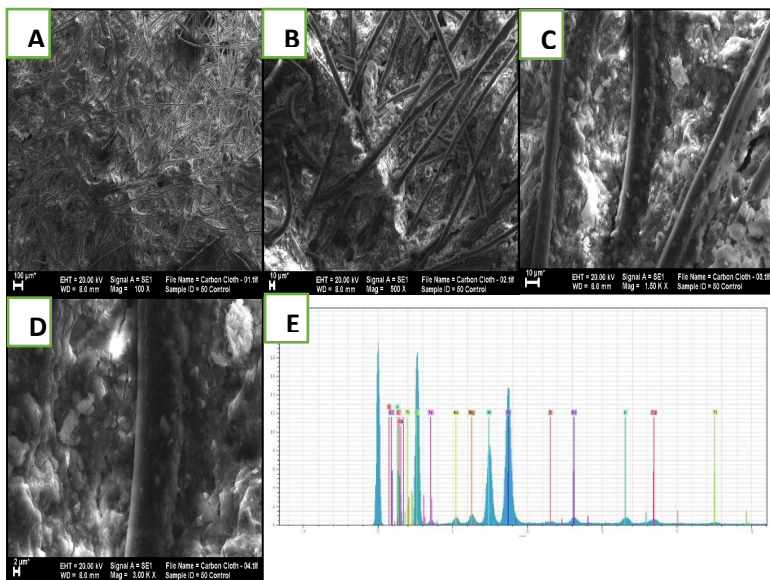
Gambar IV.19 Hasil Analisa SEM dan EDX elektroda *Carbon Cloth* dengan variabel 5% *molasses* dengan *Ti-Wire* minggu ke-9, A, B, C, dan D menunjukkan hasil Analisa SEM pada perbesaran 100x, 500x, 1500x, dan 3000x. E menunjukkan hasil spektrum EDX pada perbesaran 3000x

Hasil Analisa SEM dan EDX elektroda *Carbon Cloth* dengan variabel 5% *molasses* dengan menggunakan *Ti-Wire* setelah dilakukan percobaan selama 9 minggu di laboratorium ditunjukkan pada Gambar IV.19 dimana A, B, C, dan D menunjukkan hasil SEM dengan perbesaran 100x, 500x, 1500x, dan 3000x, sedangkan E menunjukkan hasil spektrum EDX pada perbesaran 3000x. Hasil dari uji SEM menunjukkan bahwa terbentuk biofilm pada permukaan anoda. Biofilm merupakan substansi polimer ekstraseluler yang terbungkus, komunitas mikroba yang menempel pada permukaan (Read, 2010). Lamanya penanaman elektroda mempengaruhi penebalan lapisan biofilm. Pembentukan biofilm dapat dilihat dari struktur morfologi permukaan *Carbon Cloth* yang tidak rata dari kondisi awal (Perbesaran 3000x). Seiring berjalannya waktu, biofilm akan berkembang dan menjadi semakin tebal sehingga menutupi anoda. Biofilm akan membentuk tahanan ekstra dan beberapa sel diperkirakan telah mati baik dipermukaan ataupun didalam biofilm. Hal tersebut menyebabkan substrat tidak dapat mencapai bakteri bagian dalam biofilm sehingga menyebabkan menurunnya kinerja dari sel tersebut.



Gambar IV.20 Hasil Analisa SEM dan EDX elektroda *Carbon Cloth* dengan variabel 5% *molasses* dengan Tembaga minggu ke-9. A, B, C, dan D menunjukkan hasil Analisa SEM pada perbesaran 100x, 500x, 1500x, dan 3000x. E menunjukkan hasil spektrum EDX pada perbesaran 3000x

Hasil Analisa SEM dan EDX elektroda *Carbon Cloth* dengan variabel 5% *molasses* dengan menggunakan tembaga setelah dilakukan percobaan selama 9 minggu di laboratorium ditunjukkan pada Gambar IV.20 dimana A, B, C, dan D menunjukkan hasil SEM dengan perbesaran 100x, 500x, 1500x, dan 3000x, sedangkan E menunjukkan hasil spektrum EDX pada perbesaran 3000x. Hasil Uji SEM pada elektroda ini menunjukkan bahwa terbentuknya biofilm pada permukaan anoda yang dapat dilihat dari gambar A sampe D yang menunjukkan morfologi permukaan yang tidak rata.



Gambar IV.21 Hasil Analisa SEM dan EDX elektroda *Carbon Cloth* dengan variabel 5% *molasses* dengan Tembaga minggu ke-9. A, B, C, dan D menunjukkan hasil Analisa SEM pada perbesaran 100x, 500x, 1500x, dan 3000x, E menunjukkan hasil spektrum EDX pada perbesaran 3000x

Hasil Analisa SEM dan EDX elektroda *Carbon Cloth* dengan variabel 5% *molasses* tanpa MMY dengan menggunakan tembaga setelah dilakukan percobaan selama 9 minggu di laboratorium ditunjukkan pada Gambar IV.21 dimana A, B, C, dan D menunjukkan hasil SEM dengan perbesaran 100x, 500x, 1500x, dan 3000x, sedangkan E menunjukkan hasil spektrum EDX pada perbesaran 3000x. Hasil SEM elektroda *Carbon Cloth* pada perbesaran 3000x menunjukkan struktur morfologi permukaan

yang tidak rata dari kondisi awal. Hal ini membuktikan adanya pembentukan biofilm pada permukaan anoda.

Tabel IV.7 Hasil pengujian SEM-EDX pada *carbon cloth* berkawat *Ti-Wire* untuk penambahan *molasses* 5% dan MMY pada minggu ke-0 sampai minggu ke-9

Carbon Cloth t_0		Carbon Cloth t_9	
Unsur	Normal (% Berat)	Unsur	Normal (% Berat)
C	97,27	C	0,67
O	2,73	O	61,15
TOTAL	100	Si	15,35
		Al	9,83
		Fe	6,39
		Ca	1,44
		Na	1,37
		K	1,07
		Cl	1,04
		Mg	1,03
		Ti	0,4
		Si	0,26
		TOTAL	100

Dari Tabel IV.7 dapat dibandingkan hasil uji *Carbon Cloth* murni dengan kandungan unsur C (97,27%) mengalami degradasi setelah 9 minggu percobaan yang dilakukan di laboratorium dengan menurunnya kandungan C menjadi 0,67%. Dari hasil uji spektrum EDX juga menunjukkan bahwa semakin lama *Carbon Cloth* digunakan maka *Carbon Cloth* akan mengalami penurunan komposisi karbon dari anoda sehingga setelah mencapai waktu tertentu performa MFCs akan mulai menurun. Munculnya unsur selain C pada saat t_9 merupakan hasil dari aktifitas metabolisme bakteri dalam hal ini adalah degradasi

biokimia dari komponen organik (Sevda dkk, 2013). Tabel IV.7 menunjukkan degradasi komponen organik (C) dan pembentukan komponen baru setelah *MFCs* beroperasi. Spektrum EDX juga menunjukkan kerusakan komponen dari *carbon cloth* yang berada di anoda seperti yang ditunjukkan pada gambar IV.19e. Dalam operasi jangka panjang, setelah waktu tertentu kinerja *MFCs* mulai berkurang. Selain itu, adanya bakteri yang mati di permukaan dalam atau luar biofilm menyebabkan substrat tidak sampai ke bakteri di lapisan dalam. Hal itu menyebabkan berkurangnya kinerja sel.

Tabel IV.8 Hasil pengujian SEM-EDX pada *carbon cloth* berkawat tembaga untuk penambahan *molasses* 5% dan MMY minggu ke-0 sampai minggu ke-9

Carbon Cloth t ₀		Carbon Cloth t ₉	
Unsur	Normal (% Berat)	Unsur	Normal (% Berat)
C	97,27	C	1,08
O	2,73	O	62,18
TOTAL	100	Si	16,32
		Al	9,49
		Fe	5,83
		Ca	1,22
		K	1,13
		Mg	1,02
		Na	0,84
		Cl	0,44
		Ti	0,39
		S	0,06
		P	0
		TOTAL	100

Dari Tabel IV.8 dapat dibandingkan hasil uji *Carbon Cloth* murni dengan kandungan unsur C (97,27%) mengalami degradasi setelah 9 minggu percobaan yang dilakukan di laboratorium dengan menurunnya kandungan C menjadi 1,08%.

Tabel IV.9 Hasil pengujian SEM-EDX pada *carbon cloth* berkawat tembaga untuk penambahan *molasses* 5% pada minggu ke-0 sampai minggu ke-9

Carbon Cloth t ₀		Carbon Cloth t ₉	
Unsur	Normal (% Berat)	Unsur	Normal (% Berat)
C	97,27	C	9,11
O	2,73	O	57,24
TOTAL	100	Si	14,48
		Al	9,11
		Fe	5
		K	1,02
		Na	0,97
		Mg	0,96
		Ca	0,92
		Cl	0,67
		Ti	0,43
		Si	0,08
		TOTAL	99,99

Dari Tabel IV.9 dapat dibandingkan hasil uji *Carbon Cloth* murni dengan kandungan unsur C (97,27%) mengalami degradasi setelah 9 minggu percobaan yang dilakukan di laboratorium dengan menurunnya kandungan C menjadi 9,11%,

Tabel IV.10 Hasil Spektrum EDX penurunan persen berat unsur
pada t_0 dan t_9

Selisih penurunan unsur elektroda t_0 dan t_9			
Unsur	t_0	t_9	Wt%
Carbon Cloth 5% <i>molasses</i> dengan Ti-W	97,27	0,67	99,31
Carbon Cloth 5% <i>molasses</i> dengan Tembaga	97,27	1,08	98,89
Carbon Cloth 5% kontrol	97,27	9,11	90,63

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

V.1 Kesimpulan

Dari hasil penelitian dan analisa yang telah dilakukan, maka dapat ditarik kesimpulan :

1. Eksternal resistansi yang paling untuk menghasilkan biolistrik terbesar adalah 1 k Ω .
2. Kombinasi medium Lumpur Lapindo dengan penambahan *molasses* yang paling optimum adalah 2,5%.
3. Tegangan listrik terbesar yang dihasilkan 210,25 volt/m², arus listrik sebesar 51,75 A/m², dan power density sebesar 38,91 watt/ m²
4. Potensi energi listrik yang dihasilkan dengan penambahan nutrisi MMY lebih besar daripada Non-MMY.
5. Penambahan dominan bakteri *Shewanella oneidensis* MR-1 dan *Escherichia coli* sebagai *starter inoculum* tidak efektif dalam menghasilkan biolistrik.
6. Bakteri di dalam Lumpur Lapindo lebih berpotensi sebagai *culture source* dibandingkan dengan adanya penambahan dominan bakteri.
7. SEM-EDX dapat digunakan untuk mengidentifikasi morfologi dan komposisi unsur yang ada di elektroda selama proses *MFCs*.

V.2 Saran

Dari hasil penelitian dan analisa yang telah dilakukan, maka saran untuk penelitian kedepan adalah

1. Perlu dilakukan penelitian dengan mencoba sumber karbon/sumber substrat selain *molasses*

2. Perlu dilakukan penelitian dengan skala besar (bila tegangan yang dihasilkan pada chamber besar, dapat dilakukan uji coba penyalan lampu kecil)

DAFTAR PUSTAKA

- Al-qadiri, H. M., Al-alam, N. I., Lin, M., Al-holy, M., Cavinato, A. G., & Rasco, B. (2007). Studying of the bacterial growth phases using fourier transform infrared spectroscopy and multivariate analysis. *Rapid Methods & Automation in Microbiology*.
- Alvin Juniawan, B. R. (2013). Karakteristik lumpur lapindo dan fluktuasi logam berat pb dan cu pada sungai porong dan aloo. *Sains dan Terapan Kimia, Vol. 7, No.1*, 50-59.
- Arisandi, P. (2006). Menebar bencana lumpur di Kali Porong. *Ecological Observation And Wetlands Conservation*.
- Arungovind, M., Purushotham, K., Arunkumar, J., & Sendilvelan, S. (2017). Analysis of microbial fuel cell for energy harvesting with waste water and molasses. *International Journal of Pharma and Bio Sciences*.
- Campo, A. G., J. Lobato, P., Cañizares, Rodrigo, M., dan Morales, F. F. (2013). Applied Energy 101. Short-term effects of temperature and COD in a microbial fuel cell, 213-217.
- Davis, F. dan Higson, S. P. J. (2007). Biofuel cells—Recent advances and applications, Biosensors and Bioelectronics, 22, 1224–1235
- Darmin, R. G. (2013). Studi komputasi reaksi adsorpsi disosiasi gas o₂ pada permukaan pt-fe dengan metode teori fungsi kerapatan. *Jurnal Kimia Mulawarman Vol.10 Nomor 2*, 64.
- Hasan, A. (2007). Aplikasi sistem fuel cell sebagai energi ramah lingkungan di sektor transportasi dan pembangkit. *JURNAL T.LINGKUNGAN*, 277-278.

- Januarita R, Azizah A, Ulfa A W A, Syahidah H, Samudro G. (2016). *MFCs 2 In 1 : Microbial Fuel Cells Pengolah Air Limbah dan Penghasil Listrik (Alternatif : Limbah Isi Rumen Sapi Dengan Pengaruh Variasi COD dan pH)*. Artikel Ilmiah-Universitas Diponegoro, 5.
- Juniawan, A., Rumhayati, B. dan Ismuyanto, B. (2013). Karakteristik Lumpur Lapindo dan Fluktuasi Logam Berat Pb dan Cu pada Sungai Porong dan Aloo. Jurusan Kimia, FMIPA, Universitas Brawijaya Malang.
- Katuri, K. P., Scott, K., Head, I. M., Picioreanu, C., & Curtis, T. P. (2011). Microbial fuel cells meet with external resistance. *Bioresource Technology*.
- Logan, B. E., Hamerelers, B., Rozendal, R., Schroder, U., Keller, J., Freguia, S., Rabaey, K. (2006). Microbial Fuel Cells: Methodology and Technology. *Enviromental Scienccce and Technology*.
- Luisa, David; Ruud A. Timmers, Marjolein Helder, Kirsten J.J. Steinbusch, Hubertus V.M. Hamelers, Cees J.N. Buisman. (2015). —Microbial solar cells: applying photosynthetic and electrochemically active organismsll. *Trends in Biotechnology*, 29, 41–49.
- M. Wijaya, R. R. (2016). Pengaruh pemberian C/N rasio berbeda terhadap pembentukan bioflok dan pertumbuhan ikan lele dumbo (*Clarias gariepinus*). *Jurnal Perikanan Kelautan Vol. VII No. 1*.
- Miroliaei, M. R., Samimi, A., Mohebbi-Kalhari, D., & Khorram, M. (2014). Kinetics investigation of diversity cultures of *E. coli* and *Shewanella sp.* *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*.
- Nair, R., Renganathan, K., Barathi, S., Venkatraman, K. (2013). Performance of salt-bridge microbial fuel cell at various agarose Concentrations using hostel sewage waste as

- substrate. *International Journal of Advancements in Research & Technology*, Vol. 2,5,326, ISSN 2278-7763
- Pandit, S., & Das, D. (2018). Principles of Microbial Fuel Cell for The Power Generation. In *Microbial Fuel Cell A Bioelectrochemical System that converts waste to watts*. springer.
- Purwatil, E., M. Latif, H. P., & Andrean, O. (2014). Inovasi sumber energi terbarukan dari perancangan prototipe microbial fuel cell tipe seri, paralel dan seri paralel dengan memanfaatkan bakteri *Escherichia coli*.
- Rohan, D., Deepa, V., Rohan, G., & Satish, B. (2013). Bioelectricity Production from Microbial Fuel using *Escherichia Coli* (Glucose and Brewery Waste). *International Research Journal of Biological Sciences*.
- Sharah, A., Karnila, R., & Desmelati. (2015). Pembuatan kurva pertumbuhan bakteri asam laktat yang di isolasi dari ikan peda kembang (*Rastrelliger* sp.).
- Sirinutsomboon, B. (2014). Modeling of a membraneless single-chamber microbial fuel cell with *molasses* as an energy source. *Int J Energy Environ Eng*.
- Sudata, H. (2001). Fuel Cell sebagai penghasil energi abad 21. *Jurnal Teknik Mesin*.
- Sunshine, Justin C., Ray, Ricky, Little, Brenda, Ringeisen dan Bradley, R. (2014). —Diversifying Biological Fuel Cell Design by Use of Nanoporous Filters‡. *Environmental Science and Technology*, 41 (4), 1444–49.
- Usman E., S. M. (2006). Paper Pendukung. *Symposium Nasional: Pembuangan Lumpur Porong-Sidoarjo Ke Laut ?*

- Wang, L., Fan, D., Chen, W., & Terentjev, E. M. (2015). Bacterial growth, detachment and cell size control on polyethylene terephthalate surfaces. *scientific report*.
- Widanarni, W. H. (2011). Pengaruh penambahan molase terhadap kelangsungan hidup dan pertumbuhan larva udang windu *Penaeus monodon* Fab. yang diberi bakteri probiotik *Vibrio* SKT-b. *Jurnal Akuakultur Indonesia*.
- Waluyo, L. (2005). Mikrobiologi Umum. UMM Press
- Xuboujun, Fei, He, Zhen, Ge, Zheng (2015). —Using Microbial Fuel Cells to Treat Raw Sludge and Primary Effluent for Bioelectricity Generation. Department of Civil Engineering and Mechanics; University of Wisconsin - Milwaukee.
- Y. Zhang, C. S. (2013). Electricity production from molasses wastewater in two-chamber microbial fuel cell. *Water Science and Technology*.

APPENDIKS A

PERHITUNGAN PEMBUATAN LARUTAN, JUMLAH BAKTERI DAN POWER DENSITY

A1. Membuat NaOH 1 N

Perhitungan menggunakan rumus:

$$\begin{aligned}\text{Normalitas} &= \frac{\text{Massa NaOH}}{\text{Mr}} \times \frac{1000}{\text{Volume}} \\ 1 &= \frac{\text{Massa NaOH}}{40} \times \frac{1000}{1000} \\ \text{Massa NaOH} &= 40\text{gr}\end{aligned}$$

A2. Membuat NaOH 0,5 mol/L

Perhitungan menggunakan rumus :

$$\begin{aligned}\text{Molaritas} &= \frac{\text{Massa NaOH}}{\text{Mr}} \times \frac{1000}{\text{Volume}} \\ 0,5 &= \frac{\text{Massa NaOH}}{40} \times \frac{1000}{1000} \\ \text{Massa NaOH} &= 20\text{gr}\end{aligned}$$

A3. Membuat NaCl 0,3 M

Perhitungan menggunakan rumus :

$$\begin{aligned}\text{Molaritas} &= \frac{\text{Massa NaOH}}{\text{Mr}} \times \frac{1000}{\text{Volume}} \\ 0,3 &= \frac{\text{Massa NaOH}}{58,5} \times \frac{1000}{1000} \\ \text{Massa NaOH} &= 17,55\text{gr}\end{aligned}$$

A4. Membuat 0,1% (w/v) glukosa dan yeast extract

$$\text{Volume} = 500 \text{ mL}$$

Maka, setiap 0,1 gr/100mL

$$\text{Berat Glukosa} = \frac{0,1 \text{ gr}}{100 \text{ mL}} \times 500 \text{ mL}$$

$$\text{Berat Glukosa} = 0,5\text{gr}$$

$$\text{Berat Yeast Extract} = \text{Berat Glukosa} = 20\text{gr}$$

A5. Menghitung Jumlah Sel

Prosedur :

- Sampel lumpur diambil dan ditimbang sebanyak 1 gr.
- Lumpur dimasukkan ke tabung reaksi dan ditambahkan aquades kemudian dilakukan pengenceran lagi hingga 6x.
- Sampel diambil dengan menggunakan pipet tetes untuk diteteskan diatas permukaan *Haemacytometer*.
- *Haemacytometer* dilakukan dibawah lensa mikroskop dengan pembesaran 400X.
- Pengamatan dilakukan untuk variabel lumpur dengan penambahan molasses 2,5% pada tanggal 30 juni 2017 didapat:

Kotak 1 = 11

Kotak 2 = 9

Kotak 3 = 13

Kotak 4 = 13

Kotak 5 = 10

56 sel/kotak

Volume Kotak = luas kotak x kedalaman kotak

Volume Kotak = $0,04 \text{ mm}^2 \times 0,1 \text{ mm}$

Volume Kotak = $0,004 \text{ mm}^3 / \text{kotak}$

= $0,000004 \text{ cm}^3$

= $0,000004 \text{ ml}$

Jumlah sel $\left(\frac{\text{sel}}{\text{kotak}}\right) = \frac{56 \text{ sel}}{5 \text{ kotak}} = 11,2 \text{ sel/kotak}$

Jumlah Sel $\left(\frac{\text{sel}}{\text{ml}}\right) = \frac{\text{Jumlah sel/kotak}}{\text{Volume kotak mm}^3} \times \text{faktor pengenceran}$

Jumlah Sel $\left(\frac{\text{sel}}{\text{ml}}\right) = \frac{11,2 \text{ sel/kotak}}{0,000004 \text{ ml}^3 / \text{kotak}} \times 2 \times 10^5$

Jumlah sel $\left(\frac{\text{sel}}{\text{ml}}\right) = 5,6 \times 10^{11} \text{ sel/ml}$

A6. Menghitung *Power Density* (Watt/m²)

Dengan menggunakan rumus Hukum Ohm yaitu $P = V \times I$.

Data yang didapat dari pengukuran dengan variabel untuk variabel lumpur dengan penambahan *molasses* 2,5% dengan eksternal resistansi 1k Ω pada tanggal 18 Agustus 2017

Keterangan : karena ada 2 elektroda pada anoda yang diukur dan memiliki 4 sisi luasan maka dibagi 40 cm².

- Menghitung *Power Density* (P)

Dari perhitungan diatas diketahui nilai $V = 841 \text{ mV} = 0,841 \text{ V}$ dan nilai $I = 123 \text{ mA} = 0,123 \text{ A}$ dengan luas permukaan $A = 0,004 \text{ m}^2$ sehingga nilai P dapat dihitung menggunakan rumus :

$$P = \frac{V \times I}{A}$$
$$P = \frac{0,841 \times 0,123}{0,004}$$
$$= 25,86 \text{ watt/m}^2$$

A.7 Menghitung kandungan organik dalam media (Lumpur dan *molasses*)

Data yang didapat dari hasil analisa untuk variabel lumpur dengan penambahan *molasses* 5% untuk perhitungan BOD

- BOD lumpur pada $t=0 = 285,8 \text{ gr/liter}$
- BOD *molasses* pada $t=0 = 501.884,3 \text{ gr/liter}$
- BOD Lumpur + *molasses* = 30,94 gr/liter
- ρ lumpur = 1,265 mg/ml
- ρ *molasses* = 1,52mg/ml

Perhitungan BOD untuk chamber yang terdiri dari lumpur Lapindo 95% dan *molasses* 5% pada saat $t=0$ adalah

BOD Lumpur

$$= \frac{285,8 \text{ gr}}{\text{liter}} \times \frac{\text{ml}}{1,265 \text{ mg}} \times \frac{\text{liter}}{1000 \text{ ml}} \times \frac{1000 \text{ mg}}{\text{gr}} \times \frac{950}{1000} \text{ gr}$$

$$\text{BOD Lumpur} = 214,632 \text{ gr}$$

BOD molasses

$$= \frac{501.884,3 \text{ gr}}{\text{liter}} \times \frac{\text{ml}}{1,52 \text{ mg}} \times \frac{\text{liter}}{1000 \text{ ml}} \times \frac{1000 \text{ mg}}{\text{gr}} \times \frac{50}{1000} \text{ gr}$$

$$\text{BOD Lumpur} = 16.509,35 \text{ gr}$$

$$\text{BOD Total} = 214,632 + 16.509,35 \text{ gr}$$

$$\text{BOD Total} = 16.723,91 \text{ gr}$$

APPENDIKS B

DOKUMENTASI PERCOBAAN

B.1 Area Lumpur Lapindo

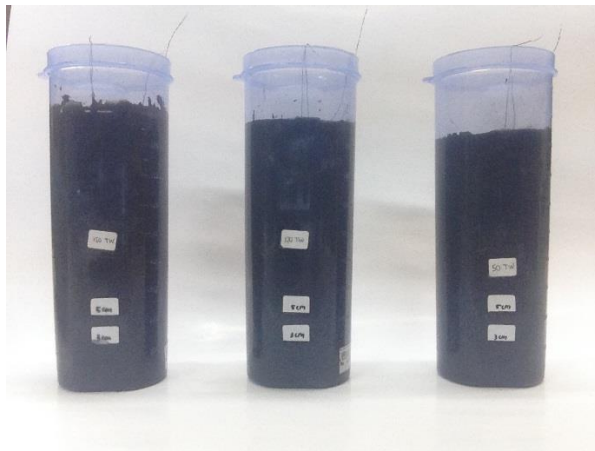
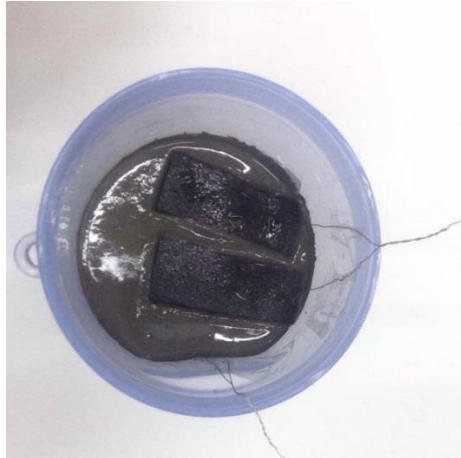


Gambar B.1 Pengambilan sampel lumpur Lapindo

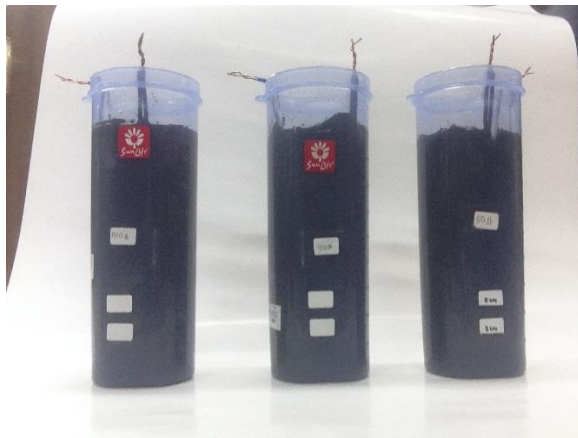
B.2 Percobaan di Laboratorium



Gambar B.2 Proses memasukkan lumpur Lapindo dan *molasses* sebagai media ke dalam *chamber*



(a)



(b)

Gambar B.3 Rangkaian sistem *MFCs* menggunakan (a) *Ti-Wire* dan (b) tembaga

LAPORAN HASIL UJI

No. 5849-5851/17/LHU/2/X/2017

Nomor Analisa : 2017P5849 s/d 2017P5851 *Tio*
Contoh : Air Lumpur Lapindo *(5% molasses)*
Merk : Terlampir
Diterima Tanggal : 25-September-2017
Catatan Sampel : 250 ml air lumpur dalam botol

Nama Pengirim : Vebey Saragih

Alamat : Jl. Keputih Perintis 1 No. 8 Surabaya –
Jawa Timur

Parameter	Satuan	Hasil uji			Metode uji
		P. 5849 (50 Kontrol non mmy)	P. 5850 (50B)	P. 5851 (50TW)	
BOD	mg/L	55,62	40,05	30,94	SNI 6989.72 : 2009
COD	mg/l	510,46	232,41	209,44	SNI 6989.2 : 2009
TOC	mg/L	18,11	49,14	51,61	SNI 06-6989.28 : 2005

Catatan :

- Parameter uji sesuai dengan permintaan

Surabaya, 11-Oktober-2017

Laboratorium
Kimia dan Lingkungan



Ardhaningtyas Riza Utami, ST, MT

NIP-197608232005022001

LAPORAN HASIL UJI

No. 3399/17/LHU/2/VII/2017

Nomor Analisa : 2017P3399

To

Nama Pengirim : Kelita Mea Melaca

Contoh : Cairan Lumpur Lapindo (lumpur saja)

Merk : -

Alamat : Perum Jenggolo Indah II Blok E-15
Gogorante Kediri - Jawa Timur

Diterima Tanggal : 14-Juni-2017

Catatan Sampel : 250 ml cairan lumpur dalam botol

Parameter Uji	Satuan	Hasil Uji	Metode Uji
BOD ₅	mg/L	285.8	SNI 6989.72 : 2009
COD	mg/L	719.64	SNI 6989.2 : 2009
Total Organik Carbon (TOC)	mg/L	28.655	SNI 06-6989.28-2005

Catatan:

- Parameter uji sesuai dengan permintaan

Surabaya, 05-Juli-2017

Laboratorium
Kimia dan Lingkungan

Catur Wulandari, ST

NIP. 198402212005022001

RIWAYAT PENULIS



Penulis bernama lengkap Veby Debora Saragih, dilahirkan di Pematangsiantar 25 Juli 1994, merupakan anak pertama dari dua bersaudara. Penulis telah menempuh pendidikan formal dimulai dari, SD RK Cinta Rakyat 4 Pematangsiantar Sumatera Utara, SMPN

SMP Bintang Timur Pematangsiantar Sumatera Utara, SMA Budi Mulia Pematangsiantar Sumatera Utara, penulis diterima di Departemen Teknik Kimia FTI-ITS pada tahun 2013 dan terdaftar dengan NRP 02211545000022. Di Departemen Teknik Kimia penulis mengambil bidang studi Pengolahan Limbah Industri, penulis telah menyelesaikan tugas pra desain pabrik dengan judul “Pra Desain Pabrik CPO (*Crude Palm Oil*) dan PKO (*Palm Kernel Oil*) Dari Buah Kelapa Sawit” dan skripsi dengan judul “Pengaruh Eksternal Resistansi dan Penambahan *Molasses* Pada Lumpur Untuk Menghasilkan Biolistrik Dengan Menggunakan *Microbial Fuel Cells*”.



Penulis bernama lengkap Kelita Mea Melaca, dilahirkan di Blitar 26 November 1994, merupakan anak pertama dari tiga bersaudara. Penulis telah menempuh pendidikan formal dimulai dari TK Kertanegara Kediri , SDK Petra Kediri, SMPN 1 Kediri, SMAN 2 Kediri, D3

Teknik Kimia FTI-ITS, penulis diterima di Departemen Teknik Kimia FTI-ITS pada tahun 2015 dan terdaftar dengan NRP 02211545000022. Di Departemen Teknik Kimia penulis mengambil bidang studi Pengolahan Limbah Industri, penulis telah menyelesaikan tugas pra desain pabrik dengan judul “Pra Desain Pabrik CPO (*Crude Palm Oil*) dan PKO(*Palm Kernel Oil*) Dari Buah Kelapa Sawit” dan skripsi dengan judul “Pengaruh Eksternal Resistansi dan Penambahan *Molasses* Pada Lumpur Untuk Menghasilkan Biolistrik Dengan Menggunakan *Microbial Fuel Cells*”.